

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

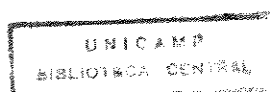
Departamento de Hidráulica e Saneamento

ARIOVALDO NUVOLARI

APLICAÇÃO DE LODO DE ESGOTOS MUNICIPAIS NO SOLO:

ensaios de respirometria para avaliar a estabilidade do lodo

Campinas, 1996



FOLHA DE APROVAÇÃO

UNICAMP - 20/08/96

...Aprovado, com distinção e louvor

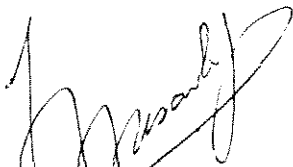
(Fonte: ata assinada pelos integrantes da banca)



Prof. Dr. Bruno Coraucci Filho



Profª Drª Doroty Carmen Pinatti Casarini



Prof. Dr. Ruben Bresaola Jr.

*Assinado em 20.08.1996 conforme o documento
Principal
20/8/96*

ARIOVALDO NUVOLARI

**APLICAÇÃO DE LODO DE ESGOTOS MUNICIPAIS NO SOLO:
ensaios de respirometria para avaliar a estabilidade do lodo**

**Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia
Civil da Universidade Estadual de Campinas, como
parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil, área de concentração: Recursos
Hídricos e Saneamento.**

Orientador: Prof. Dr. BRUNO CORAUCCI FILHO

Campinas, 1996

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

N979a

Nuvolari, Ariovaldo

**Aplicação de lodo de esgotos municipais do solo :
ensaios de respirometria para avaliar a estabilidade do
lodo / Ariovaldo Nuvolari.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.**

Orientador: Bruno Coraucci Filho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Esgotos - Resíduos. 2. Resíduos orgânicos. 3. Solos
- Correção. 4. Respiração - Medição. I. Coraucci Filho,
Bruno. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade
de Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao mestre, que acabou se tornando um amigo, Prof. Dr. **BRUNO CORAUCCI FILHO**, pela orientação firme, segura e sobretudo humana. À diretoria e a todos os professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento da FEC-UNICAMP, que de forma direta ou indireta nos apoiaram nesta empreitada, em especial ao Prof. Dr. **Dirceu Brasil Vieira**, Prof. Dr. **Roberto Feijó de Figueiredo**, Prof. Dr. **Rubens Bresaola Jr.**, Prof. Dr.^a **Eglé N. Teixeira**, Prof. Dr. **José R. Guimarães** e Prof. **Edson A. A. Nour**. Aos funcionários e estagiários do Laboratório de Saneamento da FEC-UNICAMP, que muito colaboraram na parte experimental desta pesquisa: **Cláudia G. Amaral**, **Luciana C.F. Souza**, **Jairo Brunini**, **Gustavo H. da Silva**, **Geraldo D. Sobrinho** e **Roberto Siviero**. Aos funcionários do Laboratório de Hidrologia da FEC-UNICAMP, em especial ao técnico **Marcelo Balbino da Silva**, pela ajuda na determinação da capacidade de campo do solo. Ao amigo **Pedro S. Fadini**, pela grande cooperação nas questões referentes à metodologia de pesquisa e de análises laboratoriais.

À diretoria da FATEC-SP: Prof.^a Dr.^a **Helena G. Peterossi** e Prof. **Paulo Gonçalves**. A todos os professores do Departamento de Hidráulica daquela instituição, em especial: Prof. **Dirceu D'Alkmin Telles**, Prof. **Acácio E. Ito** e Prof. **José Tarcísio Ribeiro**, pelo apoio e incentivo. À Prof.^a Dr.^a **Eliana Magrini Fochi**, pela correção ortográfica de todo o texto.

Aos diretores do Departamento de Água e Esgotos do Município de São Bernardo do Campo, em especial ao Eng.^o **Mauro Valeri**, pela cessão e transporte do lodo e do solo utilizados nesta pesquisa. À Prof.^a Dr.^a **Dorothy C. P. Casarini**, da CETESB, pelo apoio, incentivo e pela cessão dos 3 primeiros respirômetros utilizados nesta pesquisa. Ao Eng.^o **Hilton Felício dos Santos**, da SABESP, pelas valiosas informações cedidas. Ao IAC - Instituto Agrônomo de Campinas, em especial à Dr.^a **Monica F. Abreu** e ao companheiro **Laudinor Gonçalves da Silva**, pelo apoio nas análises de caracterização do solo e do lodo.

À minha esposa **Leonice**, aos meus filhos **Daniel** e **Juliana**, pela compreensão. A **DEUS**, por ter me dado saúde, nesta empreitada.

SUMÁRIO

	- LISTA DE FIGURAS	vii
	- LISTA DE TABELAS	ix
	- LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xii
	- RESUMO	xvi
	- ABSTRACT	xvii
1	- INTRODUÇÃO:	1
1.1	- Considerações preliminares	1
1.2	- Objetivos desta pesquisa	4
2	- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:	5
2.1	- Histórico	5
2.2	- Tratamento prévio do lodo para sua utilização e/ou disposição	17
2.2.1	- Os processos de estabilização do lodo	17
2.2.2	- Métodos de medida da estabilidade do lodo	20
2.2.2.1	- Generalidades	20
2.2.2.2	- Método do "DTA" "Differential Thermal Analysis"	23
2.2.2.3	- Método do "ATP" (trifosfato de adenosina)	23
2.2.2.4	- Respirometria	24
2.2.3	- Os processos de desidratação do lodo	29
2.2.3.1	- Leitos de secagem	30
2.2.3.2	- Processos mecanizados de desidratação	30
2.2.3.3	- Tratamento Térmico	31
2.2.3.4	- Incineração	32
2.2.4	- A necessidade de desinfecção do lodo	33
2.2.5	- A presença de elementos potencialmente tóxicos no lodo	35

2.2.6	- Utilizações não convencionais para o lodo	40
2.2.6.1	- Produção de óleo combustível	40
2.2.6.2	- Produção de tijolos	41
2.3	- A utilização do lodo para melhoria dos solos.....	42
2.3.1	- A matéria orgânica no solo	42
2.3.2	- Adsorção e troca iônica	44
2.3.3	- Microrganismos do solo	48
2.3.4	- Aplicação de lodo no solo (na forma líquida)	49
2.3.5	- Aplicação de lodo desidratado no solo	51
2.3.6	- Utilização do lodo após compostagem	52
2.3.7	- Utilização do lodo como adubo organo-mineral	53
3	- METODOLOGIA	55
3.1	- Considerações Preliminares	55
3.2	- O trabalho experimental	55
3.3	- Materiais, equipamentos e outros	58
3.3.1	- Lodo líquido	58
3.3.2	- Solo	59
3.3.3	- Cuba para lançamento de lodo no solo	59
3.3.4	- Respirômetros	62
3.3.5	- Equipamentos, aparelhos e outros.....	62
3.3.6	- Vidraria, utensílios de laboratório e outros	65
3.3.7	- Principais reagentes	65
3.4	- Caracterização preliminar e monitoramento do solo.....	65
3.4.1	- Preparo do solo para caracterização	65
3.4.1.1	- Coleta de solo na origem	65
3.4.1.2	- Obtenção da TFSA (terra fina seca ao ar)	66
3.4.2	- Determinação da massa específica aparente (solo solto)	66
3.4.3	- Determinação da capacidade de campo do solo	67
3.4.4	- Determinação do pH e da curva de neutralização do solo	68
3.4.4.1	- Procedimentos para determinação do pH do solo	68

3.4.4.2	- Procedimentos para determinação da curva de neutralização do solo	69
3.4.5	- Determinação do teor de umidade e de sólidos voláteis do solo	69
3.4.5.1	- Amostragem	69
3.4.5.2	- Procedimentos	69
3.4.5.3	- Cálculos	70
3.4.6	- Determinação do teor de carbono "C" e de matéria orgânica "MO" do solo ..	70
3.4.6.1	- Preparo de reagentes e soluções	70
3.4.6.2	- Procedimentos	71
3.4.6.3	- Cálculos	71
3.4.7	- Determinação da curva granulométrica e da textura do solo	72
3.4.8	- Determinação do teor de macro-nutrientes no solo (N, P, K, Ca e Mg)	72
3.4.8.1	- Determinação do nitrogênio (disponível)	72
3.4.8.2	- Determinação de fósforo, potássio, cálcio e magnésio do solo	73
3.5	- Caracterização preliminar do lodo	73
3.5.1	- Teor de umidade " h_L "; teor de sólidos totais " ST_L ", teor de sólidos totais fixos " STF_L "; teor de sólidos totais voláteis " STV_L " e concentração de sólidos do lodo " CS_L " e massa específica do lodo " γ_L "	73
3.5.2	- Determinação do valor de pH do lodo	73
3.5.3	- Determinação do teor de carbono e de matéria orgânica do lodo	73
3.5.3.1	- Preparo da amostra	73
3.5.3.2	- Procedimentos de análise	74
3.5.4	- Teor de elementos poluentes no lodo	74
3.6	- Preparação das amostras para o ensaio de respirometria	74
3.6.1	- 1ª Alternativa - Filtragem do lodo em kitassato	75
3.6.2	- Montagem de cubas para aplicação de lodo no solo	75
3.6.2.1	- Procedimentos adotados na 2ª fase	75
3.6.2.2	- Cálculo do volume de lodo aplicado nas cubas	77
3.7	- Ensaio de respirometria	78
3.7.1	- Descrição sumária do método	78
3.7.2	- Preparo de reagentes	78

3.7.2.1	- Água destilada isenta de CO_2 (AD- CO_2)	78
3.7.2.2	- Solução de hidróxido de potássio (KOH-0,4 N)	79
3.7.2.3	- Solução padrão de ftalato ácido de potássio ($\text{C}_6\text{H}_4\text{COOK.COOH}$ - 0,2 N)	79
3.7.2.4	- Solução de ácido clorídrico (HCl-0,2N)	79
3.7.2.5	- Solução padrão de carbonato de sódio (Na_2CO_3 -0,1N)	80
3.7.2.6	- Solução de cloreto de bário ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -1N)	80
3.7.2.7	- Solução indicadora de vermelho de metila	80
3.7.2.8	- Solução indicadora de fenolftaleína	80
3.7.3	- Procedimentos para o ensaio de respirometria	81
3.7.3.1	- Ajuste do valor de pH do solo	81
3.7.3.2	- Preparo da mistura solo-lodo	81
3.7.3.3	- Balanceamento de nutrientes	82
3.7.3.4	- Ajuste do teor de umidade do solo e da mistura solo-lodo	82
3.7.3.5	- Montagem dos respirômetros	82
3.7.3.6	- Apuração dos resultados	85
4	- RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
4.1	- 1ª Fase - Aferição de Procedimentos	87
4.1.1	- Montagem dos protótipos na 1ª fase	87
4.1.2	- Aplicações de lodo na cuba 15 - 1ª fase	87
4.1.3	- 1ª fase - Monitoramento do solo-controle e das misturas solo-lodo (amostras coletadas nas cubas "0" e "15")	88
4.1.4	- Monitoramento do solo-controle e das misturas solo-lodo (análises iniciais e finais das amostras incubadas nos respirômetros)	91
4.1.5	- Incubação dos respirômetros na 1ª fase	92
4.1.6	- Capacidade de campo do solo "CC" e ponto de murchamento "PM"	93
4.1.7	- Análise dos resultados de GRGC medidos nos respirômetros da 1ª fase	94
4.2	- 2ª fase - Coleta definitiva de dados	96
4.2.1	- Montagem dos protótipos na 2ª fase	96
4.2.2	- Caracterização do solo utilizado na 2ª fase	97
4.2.3	- Aplicações de lodo nas cubas da 2ª fase	97

4.2.3.1	- Aplicação de água destilada na cuba “0”	98
4.2.3.2	- Aplicações de lodo na cuba “5”	99
4.2.3.3	- Aplicação de lodo na cuba “10”	100
4.2.3.4	- Aplicação de lodo na cuba “15”	100
4.2.4	- 2ª fase - Monitoramento do solo-controle e das misturas solo-lodo (amostras coletadas nas cubas: 0, 5, 10 e 15, ao longo do tempo)	101
4.2.4.1	- pH (em H ₂ O)	101
4.2.4.2	- Teor de umidade “h”	102
4.2.4.3	- Teor de sólidos voláteis “SV”	104
4.2.4.4	- Teor de carbono “C”	104
4.2.4.5	- Teor de matéria orgânica “MO”	105
4.2.5	- 2ª fase - Monitoramento do solo-controle e das misturas solo-lodo (valores iniciais e finais nas amostras incubadas nos respirômetros)	105
4.2.6	- Incubação dos respirômetros na 2ª fase	107
4.2.7	- Análise dos resultados de GRGC medidos nos respirômetros da 2ª fase	108
4.2.7.1	- Ocorrências durante a fase experimental	108
4.2.7.2	- Resultados da respirometria na 2ª fase	109
4.2.7.2.1	- Tab. 6.1.12 e 6.1.13 e Fig. 6.2.7 e 6.2.8 (1ª aplicação de lodo)	110
4.2.7.2.2	- Tab. 6.1.14 e Fig. 6.2.9 (1ª reaplic. de lodo na cuba “5”)	111
4.2.7.2.3	- Tab. 6.1.15 e Fig. 6.2.10 (2ª reaplic. de lodo na cuba “5”)	111
4.2.7.2.4	- Tab. 6.1.16 e Fig. 6.2.11 (3ª reaplic. de lodo na cuba “5”)	111
4.2.7.2.5	- Tab. 6.1.17 e Fig. 6.2.12 (4ª reaplic. de lodo na cuba “5”)	112
4.2.7.2.6	- Valores médios de GRGC	112
5	- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	116
6	- ANEXOS	120
6.1	- TABELAS	120
6.2	- FIGURAS	139
7	- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149

LISTA DE FIGURAS:

Fig. 3.1	- LOCALIZAÇÃO DA ETE RIACHO GRANDE - SBC - SP - MAPA GERAL E DETALHE DA R.M.S.P	60
Fig. 3.2	- ESQUEMA DA CUBA PARA LANÇAMENTO DE LODO NO SOLO	61
Fig. 3.3	- ESQUEMA DO RESPIRÔMETRO PADRÃO (BARTHA)	63
Fig. 3.4	- ESQUEMA DO RESPIRÔMETRO ALTERNATIVO	64
Fig. 6.2.1	- CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO - 1ª e 2ª FASES	140
Fig. 6.2.2	- 1ª FASE - CURVAS: GRGC ACUM. x TEMPO (Respirômetros: 0-A e B; 15-A e B; 30-A e B)	140
Fig. 6.2.3	- 1ª FASE - CURVAS: GRGC MÉDIA ACUM. x TEMPO (média de 2 respirômetros)	141
Fig. 6.2.4	- 1ª FASE - CURVAS: GRGC MÉDIA DIÁRIA x TEMPO (média de dois respirômetros)	141
Fig. 6.2.5	- 1ª FASE - CURVA: GRGC MÉDIA EFETIVA x TEMPO (para a 1ª aplicação de lodo na cuba 15)	142
Fig. 6.2.6	- 2ª FASE - CORRELAÇÃO MO/SV DAS AMOSTRAS COLETADAS NAS CUBAS E NOS RESPIRÔMETROS	142
Fig. 6.2.7	- 2ª FASE - CURVAS: GRGC ACUM. x TEMPO (Respirômetros: 0-A, B e C; 5-A, B e C)	143
Fig. 6.2.8	- 2ª FASE - CURVAS: GRGC ACUM. x TEMPO (Respirômetros: 10-A, B e C; 15-A, B e C)	143
Fig. 6.2.9	- 2ª FASE - CURVAS: GRGC ACUM. x TEMPO (Respirômetros: 5R1-A, B e C; 10R1-A, B e C)	144
Fig. 6.2.10	- 2ª FASE - CURVAS: GRGC ACUM. x TEMPO (Respirômetros: 10R2-A, B e C; 15R2-A, B e C)	144

Fig. 6.2.11	- 2ª FASE - CURVAS: GRGC ACUM. x TEMPO (Respirômetros: 15R3-A, B e C; 20R3-A, B e C)	145
Fig. 6.2.12	- 2ª FASE - CURVAS: GRGC ACUM. x TEMPO (Respirômetros: 20R4-A, B e C; 25R4-A, B e C)	145
Fig. 6.2.13	- 2ª FASE - CURVAS: GRGC MED. ACUM. x TEMPO (1ª aplic. de lodo nas cubas: 5, 10 e 15 e 1ª reaplic.)	146
Fig. 6.2.14	- 2ª FASE - CURVAS: GRGC MÉDIA ACUM. x TEMPO (2ª, 3ª e 4ª reaplicações de lodo na cuba 5)	146
Fig. 6.2.15	- 2ª FASE - CURVAS: GRGC MEDIA DIÁRIA x TEMPO (1ª aplic. lodo cubas: 5, 10 e 15 e 1ª reaplic. cuba 5).....	147
Fig. 6.2.16	- 2ª FASE - CURVAS: GRGC MED. DIÁRIA x TEMPO (2ª, 3ª e 4ª reaplic. de lodo na cuba 5)	147
Fig. 6.2.17	- 2ª FASE - CURVAS: GRGC MEDIA EFETIVA x TEMPO (1ª aplicação de lodo nas cubas: 5, 10 e 15)	148
Fig. 6.2.18	- 2ª FASE - CURVAS: GRGC MÉDIA EFETIVA x TEMPO (1ª aplic.; 1ª, 2ª, 3ª e 4ª reaplic. de lodo na cuba 5)	148

LISTA DE TABELAS:

Tab. 2.1	- DIRETRIZES DA COMUNIDADE EUROPEIA (DE 1986), PARA METAIS, MONITORADOS NO LODO E NO SOLO AGRÍCOLA QUE O RECEBE (valores máximos permissíveis em bases secas)	10
Tab. 2.2	- LIMITES DE POLUENTES NO LODO E NOS SOLOS QUE RECEBEM LODO, NOS EUA.....	11
Tab. 2.3	- POLUENTES ENCONTRADOS NOS LODOS DE ESGOTOS MUNICIPAIS (faixa de variação em mg do poluente por kg de lodo, em peso seco)	13
Tab. 2.4	- OUTRAS SUBSTÂNCIAS E NUTRIENTES PRESENTES NOS LODOS DE ESGOTOS MUNICIPAIS	14
Tab. 2.5	- ESTIMATIVA DE VAZÕES TRATADAS (em m ³ /s) E DE PRODUÇÃO DE LODO (em t/dia de sólidos secos) NAS ETES, PARA A RMSP	14
Tab. 2.6	- EVOLUÇÃO DA GERAÇÃO DE CO ₂ AO LONGO DO PERÍODO DE INCUBAÇÃO (para lodo de esgotos municipais)	27
Tab. 2.7	- EVOLUÇÃO DA GERAÇÃO DE CO ₂ AO LONGO DO TEMPO (para lodos contendo resíduos oleosos de refinaria de petróleo)	28
Tab. 2.8	- CONCENTRAÇÕES LIMITES PARA METAIS PESADOS E OUTRAS SUBSTÂNCIAS PERIGOSAS NO LODO PARA SUA UTILIZAÇÃO COMO FERTILIZANTE (no Japão)	36
Tab. 2.9	- INFLUÊNCIA DO PH NA CTC DOS SOLOS	48
Tab. 2.10	- QUANTIDADE DE MICRORGANISMOS NOS SOLOS	49
Tab. 2.11	- CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO FERTILIZANTE ORGANO-MINERAL DE LODO (valores de concentração em mg do elemento por kg de fertilizante seco)	54
Tab. 3.1	- RESUMO DO TRABALHO EXPERIMENTAL	56

Tab. 6.1.1	- 1ª e 2ª FASES - CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	121
Tab. 6.1.2	- 1ª e 2ª FASES - CARACTERIZAÇÃO DO LODO	122
Tab. 6.1.3	- 1ª FASE - ACOMPANHAMENTO DOS VALORES DE pH, TEOR DE UMIDADE, TEOR DE SÓLIDOS VOLÁTEIS, TEOR DE CARBONO E DE MATÉRIA ORGÂNICA DAS AMOSTRAS DE SOLO COLETADAS NAS CUBAS	123
Tab. 6.1.4	- 1ª FASE - VALORES DE pH, TEOR DE UMIDADE, TEOR DE SÓLIDOS VOLÁTEIS, TEOR DE CARBONO E DE MATÉRIA ORGÂNICA, NO SOLO E NAS MISTURAS SOLO-LODO, DAS AMOSTRAS INCUBADAS NOS RESPIRÔMETROS	123
Tab. 6.1.5	- 1ª e 2ª FASES - RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO (ensaio: membrana de Richards)	124
Tab. 6.1.6	- 1ª FASE - ACOMPANHAMENTO DA GRGC NOS RESPIRÔMETROS: 0-A, 0-B, 15-A, 15-B, 30-A e 30-B	125
Tab. 6.1.7	- 1ª FASE - GRGC: MÉDIA, MÉDIA ACUMULADA, MÉDIA DIÁRIA e MÉDIA EFETIVA	126
Tab. 6.1.8	- 2ª FASE - ACOMPANHAMENTO DOS VALORES DE pH, TEOR DE UMIDADE, TEOR DE SÓLIDOS VOLÁTEIS, TEOR DE CARBONO E DE MATÉRIA ORGÂNICA DAS AMOSTRAS DE SOLO COLETADAS NAS CUBAS	127
Tab. 6.1.9	- 2ª FASE - CORREÇÃO DO pH DO SOLO (CUBA 5), COM ADIÇÃO DE CaCO_3	127
Tab. 6.1.10	- ÍNDICES PLUVIOMÉTRICOS (mm/dia) - POSTO DA FEAGRI - UNICAMP - PERÍODO: OUTUBRO DE 1994 a NOVEMBRO DE 1995	128
Tab. 6.1.11	- 2ª FASE - VALORES INICIAIS E FINAIS DE pH, TEOR DE UMIDADE, TEOR DE SÓLIDOS VOLÁTEIS, TEOR DE CARBONO E DE MATÉRIA ORGÂNICA, NO SOLO E NAS MISTURAS SOLO-LODO, NAS AMOSTRAS INCUBADAS NOS RESPIRÔMETROS.....	129

Tab. 6.1.12	- 2ª	FASE	-	ACOMPANHAMENTO DA GRGC NOS	
		RESPIRÔMETROS: 0-A, B e C e 5-A, B e C			130
Tab. 6.1.13	- 2ª	FASE	-	ACOMPANHAMENTO DA GRGC NOS	
		RESPIRÔMETROS: 10-A, B e C e 15-A, B e C			131
Tab. 6.1.14	- 2ª	FASE	-	ACOMPANHAMENTO DA GRGC NOS	
		RESPIRÔMETROS: 5R1-A, B e C e 10R1-A, B e C			132
Tab. 6.1.15	- 2ª	FASE	-	ACOMPANHAMENTO DA GRGC NOS	
		RESPIRÔMETROS: 10R2-A, B e C e 15R2-A, B e C			133
Tab. 6.1.16	- 2ª	FASE	-	ACOMPANHAMENTO DA GRGC NOS	
		RESPIRÔMETROS: 15R3-A, B e C e 20R3-A, B e C			134
Tab. 6.1.17	- 2ª	FASE	-	ACOMPANHAMENTO DA GRGC NOS	
		RESPIRÔMETROS: 20R4-A, B e C e 25R4-A, B e C			135
Tab. 6.1.18	- 2ª	FASE	-	ACOMPANHAMENTO DA GRGC - VALORES	
		MÉDIOS DE 3 RESPIRÔMETROS (para a 1ª aplicação de lodo nas			
		cubas: 5, 10 e 15			136
Tab. 6.1.19	- 2ª	FASE	-	ACOMPANHAMENTO DA GRGC - Valores médios	
		para a 1ª e 2ª reaplic. de lodo na cuba 5, com taxas repetidas de 5			
		tds/ha e respectivos solos-controle).			137
Tab. 6.1.20	- 2ª	FASE	-	ACOMPANHAMENTO DA GRGC - Valores médios	
		para a 3ª e 4ª reaplic. de lodo na cuba 5, com taxas repetidas de 5			
		tds/ha e respectivos solos-controle			138

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A. , AA.	Autor (es)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C.	Antes de Cristo (relativo a datas)
AD-CO₂	Água destilada isenta de CO ₂
APHA	"American Protection Health Association"
ATP	Trifosfato de adenosina
BIDIM	Manta geotextil para drenagem sub-superficial
γ	Massa específica aparente do solo
γ_s	Massa específica aparente seca do solo
γ_l	Massa específica do lodo
C	teor de carbono orgânico do solo (%)
C.C.	Capacidade de campo (relativo a solos)
C.E.C.	"Commission of the European Communities"
CETESB	Cia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
CFR	"Code of Federal Regulation" (nos EUA)
cm	Centímetro (unid. comprimento = 10 ⁻² m)
CSL	Concentração de sólidos no lodo
CTA	Capacidade de troca aniônica (de solos)
CTC	Capacidade de troca catiônica (de solos)
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
d.C.	Depois de Cristo (relativo a datas)
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DOE-NWC	Departamento de Meio Ambiente - Conselho Nacional das Águas da Grã-Bretanha

DTA	"Differential Thermal Analysis" - Análise Térmica Diferencial
ETE	Estação de tratamento de esgotos
EUA	Estados Unidos da América
f	fator de correção da normalidade do sulfato ferroso amoniacal
FIA	"Flow Injection Analysis"- Análise em fluxo contínuo
Fig.	Figura
g	Grama (unid. massa = 10^{-3} kg)
GRGC	Geração respirométrica de gás carbônico
°C	Graus Celsius (unid. temperatura)
h	Teor de umidade do solo ou da mistura solo-lodo
h	Hora
ha	Hectare (unidade de área = 10.000 m^2)
hab.	Habitante
h_L	Teor de umidade do lodo
h_R	Teor de umidade residual do solo
IAC	Instituto Agronômico de Campinas
kg	Quilograma (unidade de massa)
kgf	Quilograma força (unid. força = 9,81 N)
km	Quilometro (unid. comprimento = 10^3 m)
l	Litro (unid. volume = 10^{-3} m^3)
l/s	Litro por segundo (unid. vazão = $10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$)
m	metro (unid. comprimento)
m^3	Metro cúbico (unid. volume = 10^3 litros)
m^3/ha	Metro cúbico por hectare (unid. de aplicação de lodo no solo)
m^3/s	Metro cúbico por segundo (unid. de vazão dos fluidos)
meq	Miliequivalente (termo químico = 10^{-3} equivalente)
mg	Miligrama (unid. massa = 10^{-6} kg)
mm	Milímetro (unid. comprimento = 10^{-3} m)
μm	Mícron ou micras, quando no plural (unid. comprimento = 10^{-6} m)
ml	Mililitro (unid. volume = 10^{-3} litros)

MO	Teor de matéria orgânica (%)
mol	Unidade utilizada em análises químicas, correspondente a $6,023 \times 10^{23}$ entidades (átomos ou moléculas)
μmol	Unidade correspondente a 10^{-6} mol
MPa	Megapascal (unid. pressão = 10^6 Pa)
m²	Metro quadrado (unidade de área)
m²/g	Metro quadrado por grama (unidade de medida de superfície específica)
m/s²	Metro por segundo ao quadrado (unid. aceleração)
N	Newton (unid. força = $1 \text{ kg} \times 1 \text{ m/s}^2$)
N	Normalidade (dos reagentes químicos)
N_{HCl}	Normalidade real do ácido clorídrico (quando da sua padronização com carbonato de sódio)
N_{KOH}	Normalidade real do hidróxido de potássio (quando da sua padronização com ftalato ácido de potássio)
N.M.P.	Número mais provável (quando da contagem de microrganismos)
NRDC	"Natural Resources Defense Council" (nos EUA)
p	Peso da amostra de solo (na determinação do teor de carbono)
p.a	Puro para análise (quando referindo-se a reagentes químicos)
Pa	Pascal (unid. pressão = 1 N/m^2)
Pa	Peso de água
PETROBRÁS	Petróleo Brasileiro S/A
%	Porcentagem
P.M.	Ponto de murchamento (das plantas por falta de água disponível no solo)
ppm	Parte por milhão (unid. concentração = 1 mg/l)
pH	Potencial hidrogeniônico
Pu	Peso úmido (de solo)
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SBC	São Bernardo do Campo (município de São Paulo)
SCDU	"Scottish Communicable Disease Unit"

s.d.	sem data
SSV	Teor de sólidos suspensos voláteis
ST	Teor de sólidos totais
ST_L	Teor de sólidos totais no lodo
STF_L	Teor de sólidos totais fixos do lodo
STV_L	Teor de sólidos totais voláteis do lodo
SV	Teor de sólidos voláteis totais
t	Tonelada (unid. massa = 10 ³ kg)
Tab.	Tabela
T_{AI}	Tempo acumulado de incubação (referindo-se aos respirômetros)
Tc	Taxa na cuba (de sólidos secos)
t/d	Tonelada por dia (unid. de produção diária, utilizada para a torta de lodo de esgoto parcialmente desidratada)
tds/ano	Tonelada de sólidos secos por ano (unid. de produção anual de lodo seco)
tds/dia	Tonelada de sólidos secos por dia
tds/ha	Toneladas de sólidos secos por hectare (unid. de aplicação de lodo no solo)
TFSA	Terra fina seca ao ar (terra utilizada nos ensaios agronômicos de laboratório)
TNO	Instituto de Pesquisas e Saúde Pública da Holanda
unid.	unidade
US\$	dólar norte americano
USDA	"United States Department of Agriculture"
USEPA	"United States Environmental Protection Agency"
V₁	Volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação do branco
V₂	Volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra
Vac	volume de água para corrigir a umidade do solo ou mistura solo-lodo, quando da incubação nos respirômetros
V_L	Volume de lodo (relativo a aplicação de lodo nas cubas)
V_N	valor de neutralização (do pH do solo)

RESUMO

O destino final do lodo gerado nas Estações de Tratamento de Esgotos Municipais (ETEs) constitui-se num sério problema, que vem sendo solucionado, em alguns países, através de diversas técnicas. A incorporação do lodo aos solos agrícolas ou de pastagens é uma das técnicas mais utilizadas, pois traz benefícios aos solos receptores, quando realizada de forma adequada. O lodo seco contém cerca de 60 a 70% de resíduos orgânicos, além de uma certa percentagem de nutrientes. Ao serem incorporados ao solo, os resíduos orgânicos sofrem degradação através de microrganismos, transformando-se em húmus, que é um ótimo condicionador de solos. No entanto, para que o lodo possa ser utilizado, deve-se conhecer as suas características, principalmente com relação a teores de metais pesados, além de se escolher corretamente o tipo de cultura a ser utilizada ou o correto manejo de pastagens, em função da presença de patógenos no lodo. Os países que já se utilizam dessas técnicas definiram recentemente diversos critérios de utilização e controle, a partir de pesquisas desenvolvidas durante décadas.

Na presente pesquisa, realizada em 2 fases de 6 meses cada, foram montados protótipos para aplicação de um lodo de esgoto municipal, proveniente de uma ETE, tipo “valão de oxidação”, exclusivamente doméstico, em estado líquido, num solo argilo-arenoso, a diferentes taxas.

Foram monitorados alguns parâmetros relacionados com a biodegradação do lodo no solo, tais como: a geração de CO_2 , pela técnica da respirometria (ABNT - 1993); o teor de umidade “h” e o teor de sólidos voláteis “SV” (por secagem até peso constante a 105° e 550° C); o “pH” (em H_2O); o teor de carbono “C” e de matéria orgânica “MO”, através das técnicas descritas por CAMARGO et alli (1986), tanto do solo-controle quanto das diversas misturas solo-lodo. São apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta pesquisa, tendo o teste respirométrico se mostrado uma excelente ferramenta, no acompanhamento do processo de degradação da matéria orgânica no solo.

ABSTRACT

The final fate of the sewage sludge, from treatment plants, is a serious problem all over the world today. The recycling of this material through its incorporation on agricultural and grazing soils is an important alternative. The dry sludge has 60-70 % of organics and some percent of nutrients. The remaining material, after its residual degradation, is a good soil conditioner. However, for correct land disposal its necessary to monitor heavy metals and pathogenic levels, in the sewage sludge and on the site soil.

In this research, divided in two phases of 6 months each, plots were employed to aplicate sewage sludge, from oxidation ditch, on a clay-sand soil, at differents rates.

The evolution of some parameters, related with the organic matter biodegradation on soil-sludge mixtures, were monitored, as: carbon dioxiid (CO_2) evolved from the microorganisms respiration, through Bartha's respirometric methods (ABNT - 1993); humidity (**h**) and volatile solids contents (**VS**); utilizing drying methods at 105° and 550° C, respectively; **pH** (in H_2O); organic carbon (**C**) and organics matter contents, utilizing oxidation methods ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ and sulphur acid). The results of experiments were analised and discussed. The Bartha's respirometry showed be a good method to accompany organic matter biodegradation on soils.

1. INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Preliminares

Esgotos municipais são águas servidas, coletadas nas áreas residenciais, comerciais e institucionais, de uma determinada cidade, podendo, ou não, receber o lançamento de efluentes industriais. Em média, a composição do esgoto municipal é de 99,9% de água e apenas 0,1% de sólidos, sendo que cerca de 75% desses sólidos, são constituídos de matéria orgânica. Entre os sólidos, existem grandes quantidades de microrganismos, inclusive patogênicos, oriundos das fezes humanas. Podem ocorrer poluentes tóxicos, da mistura com efluentes industriais (METCALF e EDDY, 1977).

Dependendo da vazão do esgoto e da vazão do corpo receptor, quando o esgoto é lançado sem receber prévio tratamento, geralmente prejudica a qualidade da água. Pode haver um declínio dos níveis de oxigênio dissolvido, afetando a sobrevivência de seres de vida aquática; exalação de gases com odor desagradável e possibilidade de contaminação de animais e seres humanos, através do consumo dessa água.

O crescimento populacional das cidades tende a agravar o problema, em consequência do aumento no volume de esgoto coletado. Salvo casos especiais, tratar esse esgoto é sempre uma medida necessária. O objetivo é manter a qualidade das águas dos corpos receptores, permitindo os diversos usos dessas águas, em especial como manancial para abastecimento público, sem riscos à saúde da população. É também importante garantir a sobrevivência dos seres de vida aquática.

Basicamente, nas estações de tratamento de esgotos "ETEs" procura-se remover os sólidos presentes no esgoto. Nos processos tradicionais de tratamento, em nível secundário, isso é feito da seguinte forma: sólidos grosseiros são removidos nas

grades; areia, nas caixas de areia; sólidos sedimentáveis, nos decantadores primários e sólidos dissolvidos, através de processos biológicos seguidos de decantação secundária.

O lodo é resultante da remoção dos sólidos sedimentáveis (lodo primário) e dos flocos biológicos (lodo secundário). Trata-se de um líquido mais concentrado em resíduos do que o esgoto bruto. Geralmente, antes da sua destinação final, esse líquido passa por tratamentos complementares: espessamento, digestão (aeróbia ou anaeróbia), condicionamento químico e desidratação, visando a promover a estabilização da matéria orgânica e a diminuição de volumes.

Torna-se importante conhecer as quantidades e as características do lodo gerado, para se decidir sobre sua destinação final. As quantidades, principalmente nas grandes cidades, preocupam os técnicos e pesquisadores. Dados estimativos europeus indicam uma produção média diária de 82 gramas de lodo (em peso seco), por habitante (VINCENT e CRITCHLEY, 1984). Tratando-se da qualidade do lodo gerado, MATTHEWS (1992) recomenda que se mantenha um equilíbrio entre dois pontos de vista extremos: um deles considera que o lodo é sempre um resíduo perigoso, que deve ser simplesmente disposto ou destruído; o segundo, que o lodo é sempre um recurso utilizável, particularmente na agricultura, e que esse recurso deve ser sempre utilizado.

As principais formas de disposição e/ou aproveitamento do lodo são a seguir apresentadas, podendo-se utilizar tanto o lodo líquido quanto o desidratado (torta).

- Disposição e/ou aproveitamento do lodo (líquido):

- . Lançamento ao mar, através de tubulações. Foi proibido a partir de 1991 nos EUA (HEMPHILL, 1992) e proposta a proibição na Europa, a partir de 1998 (MATTHEWS, 1992);
- . Disposição em lagoas de lodo - em geral, utilizadas na estocagem do lodo para posterior aproveitamento em solos agrícolas (STEINLE, 1993);
- . Aplicação em solos agrícolas.

- Disposição e/ou aproveitamento do lodo (desidratado):

- . Disposição final em aterros sanitários, juntamente com os resíduos sólidos municipais ("landfill"), ou em aterros exclusivos para lodo ("monofill");
- . Incineração, com posterior aterramento das cinzas;
- . Lançamento ao mar através de embarcações - da mesma forma que o lodo líquido, foi proibido nos EUA e está sendo proibido na Europa;
- . Aplicação direta da torta como condicionador de solos;
- . Produção de condicionadores de solo a partir da torta, através de compostagem, misturada ou não a outros resíduos orgânicos;
- . Produção de adubos organo-minerais, envolvendo altas temperaturas, que eliminam os organismos patogênicos, e, normalmente, com a correção dos teores de nutrientes;
- . Produção de agregados leves para concreto;
- . Produção de tijolos;
- . Produção de óleo combustível.

O lodo de esgoto apresenta, em sua constituição, matéria orgânica "**MO**" em diferentes estágios de degradação (**HARTENSTEIN, 1981**). A aplicação de lodo melhora as características do solo, em virtude da matéria orgânica presente. Segundo **JORGE (1975)**, a presença da MO melhora a estrutura do solo, interferindo favoravelmente na sua capacidade de aeração, de drenagem, de retenção de água, de resistência à erosão e na capacidade de troca catiônica. Na verdade, o material remanescente, resultante da ação microbiológica sobre a MO, denominado "húmus" é que confere ao solo essas propriedades. Os nutrientes presentes no lodo e liberados durante a biodegradação da MO melhoram também as características de fertilidade do solo, aumentando a disponibilidade desses elementos para as plantas.

No entanto, a aplicação de lodo no solo não pode ser feita indiscriminadamente. Existem, em alguns casos, problemas relacionados com a presença excessiva de metais tóxicos, de nutrientes solúveis (principalmente nitratos) e de patogênicos no lodo, que devem ser levados em consideração. Esses fatores estão

diretamente relacionados com as taxas de aplicação de lodo no solo e com o tipo de cultura agrícola a ser utilizada.

Na Europa e nos EUA, é bastante antiga a utilização do lodo no solo. No entanto, só recentemente foram definidas normas, elaboradas com base em pesquisas realizadas durante décadas.

A simples disposição em aterros sanitários ou mesmo "monofill" é uma tendência em algumas cidades, distantes da zona rural, mas é considerada uma solução de descarte e que também utiliza grandes áreas. Essas práticas também requerem cuidados especiais na escolha da área, no projeto, na implantação, e exigem monitoramento.

No Brasil, a maioria das cidades ainda não faz o tratamento dos seus esgotos. Fatalmente, terão de fazê-lo mais cedo ou mais tarde e, dependendo do sistema adotado, o lodo será também um problema a ser equacionado. O aproveitamento do lodo pode se tornar viável, em muitos casos, sendo a aplicação no solo bastante interessante. Pode ser feito com a finalidade de melhoria de solos agrícolas; recuperação de áreas degradadas por erosões; aplicação em parques, jardins, florestas ou terrenos marginais. No entanto, é importante conhecer e, se possível, quantificar as alterações favoráveis e/ou desfavoráveis, provocadas no solo, em consequência da disposição do lodo.

1.2 - Objetivo desta pesquisa

Utilizando-se de protótipos, contendo todos eles o mesmo tipo de solo, serão feitas aplicações de um lodo de esgoto municipal, em estado líquido, a diferentes taxas. Além da caracterização inicial do solo e do lodo, serão coletadas amostras, ao longo do tempo, para monitorar a geração de CO₂ (respirometria); o pH e os teores: de umidade, de sólidos voláteis, de carbono e de matéria orgânica, do solo-controle e das misturas solo-lodo. Com o teste respirométrico pretende-se acompanhar a biodegradação da matéria orgânica presente no lodo, nas diferentes taxas de aplicação, baseando-se na metodologia apresentada no projeto de norma ABNT- 01:603.06-007 (1993). Pretende-se ainda conhecer o comportamento dos demais parâmetros citados, ao longo do tempo, e, com esses dados, fornecer subsídios para um possível aproveitamento desse tipo de lodo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Histórico

A coleta das águas servidas já era uma preocupação das civilizações antigas. Em 3750 a.C., eram construídas galerias de esgotos em Nipur (Índia) e na Babilônia. Em 3100 a.C. já se tem notícia do emprego de manilhas cerâmicas (**AZEVEDO NETTO, 1984**). Na Roma Imperial eram feitas ligações diretas das casas até os canais. Por se tratar de uma iniciativa individual de cada morador, nem todas as casas apresentavam essas benfeitorias (**METCALF e EDDY, 1977**).

Na Idade Média não se tem notícia de grandes realizações, no que diz respeito à coleta de esgotos. Essa despreocupação com os esgotos, aliada ao desconhecimento da microbiologia até meados do século XIX, certamente foram as causas das grandes epidemias ocorridas na Europa no período entre os séculos XVI e XIX, coincidindo com o crescimento das populações e o início do aglomeramento urbano em algumas cidades (**SAWYER e McCARTY, 1978**).

A correlação entre o crescimento populacional e o recrudescimento dos problemas com a saúde pública fica fácil de perceber, quando se apresentam os números desse crescimento. Segundo **REICHARDT (1985)**, estima-se que, por volta de 6000 a.C. a população da Terra era de 5 milhões de habitantes. Em 1850 d.C. esse número era de 1 bilhão; em 1930 - 2 bilhões; por volta de 1980 - 4 bilhões. Uma estimativa para o ano 2007 é de que a população da Terra atingirá o montante de 7 bilhões de habitantes.

Em Londres (Inglaterra), somente em 1815 os esgotos começaram a ser lançados em redes coletoras; em Hamburgo (Alemanha), em 1842, e em Paris (França), em 1880 (**METCALF e EDDY, 1977**).

Em 1822 foi feito o primeiro levantamento das condições sanitárias do Rio Tâmisa, na Inglaterra. Em 1826 ocorreu uma terrível pandemia de cólera na Europa. Em 1831, grande epidemia de cólera na Inglaterra, fez 50 mil vítimas fatais. **(AZEVEDO NETTO, 1984).**

A preocupação com o tratamento dos esgotos surgiu primeiramente na Inglaterra, após uma nova epidemia de cólera ocorrida em 1848, com 25.000 vítimas fatais. Esse país, devido à pouca extensão de seus rios e ao crescimento acelerado de algumas cidades, foi, aparentemente, um dos primeiros a sofrer as consequências da poluição hídrica, decorrente do lançamento dos esgotos (sem tratamento), nos corpos d'água. Foi também pioneiro na promulgação das primeiras leis de saneamento e saúde pública **(METCALF e EDDY, 1977)**. Ainda em Londres, no ano de 1854, foi estabelecido um marco muito importante: John Snow provou cientificamente a relação entre certas doenças e a qualidade das águas. Em 1857, foi criado o Conselho de Proteção das águas do Rio Tâmisa, na Inglaterra **(AZEVEDO NETTO, 1984)**.

Em 1860, aparece o dispositivo de Mouras para tratar os lodos de esgotos por processo anaeróbio; em 1865, fazem-se os primeiros experimentos sobre microbiologia de degradação de lodos. Os fundamentos biológicos, que acabariam dando origem ao processo de tratamento de esgotos, através de **lodos ativados**, começaram a ser investigados, na Inglaterra, em 1882, tendo culminado com o desenvolvimento do citado processo em 1914, por Arden e Lockett **(METCALF e EDDY, 1977)**.

Com o grande desenvolvimento das cidades, ocorrido a partir do final do século XIX e início do século XX, outros países seguiram o exemplo inglês e começaram a se preocupar com o tratamento de seus esgotos. Em 1887 foi construída a Estação Experimental Lawrence, em Massachusetts, nos EUA **(METCALF e EDDY, 1977)**.

Pode-se afirmar que, a partir daí, os países mais desenvolvidos, em especial a Inglaterra, a maioria dos outros países europeus, os EUA, o Canadá, a extinta União Soviética e, mais recentemente o Japão, começaram a tratar os esgotos de suas cidades. Nas cidades brasileiras, somente a partir da década de 70 começou a ocorrer um certo avanço nessa área, ainda em algumas poucas cidades. No entanto, até a presente data, a maioria das cidades brasileiras nem coletam e nem fazem o tratamento de seus esgotos e muitas delas terão

fatalmente que fazê-lo, sob pena de ficarem sem mananciais de água apropriada para o abastecimento público.

Tendo começado a tratar seus esgotos, os técnicos e administradores de serviços públicos daqueles países logo se deram conta do surgimento de um outro problema a ser resolvido, ou seja, o que fazer com o lodo, gerado na maioria das estações de tratamento. Assim, as práticas para aproveitamento ou simples disposição do lodo são também bastante antigas nos países mais adiantados. Na década de 70, devido à utilização indiscriminada de certas práticas, com pouco ou nenhum controle ambiental, começou a haver preocupação com a falta de regulamentação.

Segundo **VINCENT e CRITCHLEY (1984)**, na década de 70, três convenções internacionais, abaixo relacionadas, fixaram acordos para controlar a disposição de resíduos no mar, com o objetivo de proteger a vida e o ambiente marinho.

- Convenção de Oslo (1972)

A finalidade dessa convenção foi a prevenção da poluição marinha, causada por resíduos lançados ao mar (entre eles o lodo de esgotos municipais), através de navios e aeronaves. Foi assinada e ratificada pelos 13 países banhados pelo Mar do Norte e Atlântico Nordeste: Grã-Bretanha, Bélgica, Dinamarca, França, Alemanha, Irlanda, Holanda, Finlândia, Noruega, Espanha e Suécia.

Em resumo: a disposição de lodo de esgotos municipais no mar foi permitida, desde que as percentagens de substâncias tóxicas fossem inferiores aos padrões estabelecidos e que se obtivesse a necessária licença dos órgãos competentes de cada país.

- Convenção de Londres (1972)

Essa Convenção foi muito similar à Convenção de Oslo, porém aplicável a todos os mares e oceanos, tendo sido assinada por 60 países.

- Convenção de Paris (1974)

Essa convenção foi assinada pela Comunidade Européia e mais 13 países europeus que margeiam o Atlântico Nordeste (a essa época ainda existiam muitos países europeus não pertencentes à comunidade européia). Foi ratificada por todos os países, exceto a Bélgica, a Irlanda e Luxemburgo. O formato da Convenção de Paris é similar às de Oslo e de Londres, mas aplicável à poluição proveniente de fontes terrestres, particularmente via tubulações.

Até a década de 70, uma das práticas mais utilizadas para dar destino final ao lodo era a sua aplicação na melhoria de solos agrícolas. No entanto, descobriu-se que nem todo lodo pode ser utilizado com essa finalidade. A descoberta de que poderiam ocorrer elementos poluentes no lodo, em especial organismos patogênicos e metais pesados, começou a preocupar a comunidade científica que, sabendo dos eventuais efeitos desses poluentes sobre seres humanos e animais, não tinha, no entanto, ainda se aprofundado em pesquisas mais conclusivas. De acordo com **VINCENT e CRITCHLEY (1984)**, a Comunidade Européia criou uma comissão para estudar o problema. A partir de 1980, a CEC - "Commission of the European Communities" encarregou-se da padronização de regulamentos e, em alguns casos, da fixação de estritas limitações à utilização do lodo no solo, nos países da Comunidade Européia, estabelecendo as seguintes diretrizes básicas a serem observadas:

- O lodo não deve ser usado quando apresentar concentração de um ou mais poluentes, acima dos estabelecidos, ou se a quantidade acumulativa desses elementos adicionados ao solo, durante um período de 10 anos, puder exceder os níveis especificados (ver Tab. 2.1);
- O lodo fresco (não estabilizado) só poderá ser utilizado no solo, se for imediatamente nele injetado ou misturado em solos aráveis;
- Nenhuma aplicação deverá ser feita em parques, "play-grounds" ou em matas e florestas, exceto quando houver uma autorização especial (das autoridades competentes de cada país);

- Áreas gramadas não deverão ser utilizadas como pastagens, e as forragens não deverão ser colhidas para alimentação de animais por, pelo menos, seis semanas após a aplicação do lodo estabilizado;
- Não deverá ser aplicado lodo em culturas que possam entrar em contato direto com este e que sejam consumidas cruas;
- O lodo não deverá ser aplicado em solos que apresentarem valor de pH menor que 6,0 após a aplicação.

Segundo **MATTHEWS (1992)**, o total de lodo de esgoto produzido em 16 países europeus (Bélgica, Alemanha Ocidental, Dinamarca, França, Grécia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Holanda, Portugal, Espanha, Inglaterra, País de Gales, Suécia, Suíça e Áustria), era de 5,5 milhões de tds/ano (toneladas de sólidos secos/ano). Esses dados eram correspondentes ao ano de 1989 para a Inglaterra, País de Gales e Áustria; 1988, para a Suécia; 1987 para a Dinamarca e a Suíça e 1984 para os demais países citados. Desse total produzido:

- 44 % eram dispostos em aterros sanitários;
- 37 % eram utilizados em solos com finalidades diversas, incluindo agricultura, horticultura, recuperação de solos, florestas e jardins;
- 9 % eram incinerados;
- 7 % dispostos no mar;
- 3 % dispostos através de outros métodos, incluindo depósitos na própria ETE, lagoas de lodo, empilhamento, aterros específicos para lodo ("monofill") etc.

MATTHEWS (1995) afirma que as diretrizes fixadas pela Comunidade Européia em 1986 (ver **Tab. 2.1**) serviram de base para que cada país, pertencente à Comunidade Européia, pudesse adotar seus próprios regulamentos.

Tab. 2.1 - DIRETRIZES DA COMUNIDADE EUROPEIA (DE 1986) PARA METAIS, MONITORADOS NO LODO E NO SOLO AGRÍCOLA QUE O RECEBE (valores máximos permissíveis em bases secas).

METAIS	NO SOLO (1) (mg/kg)	NO LODO (mg/kg)	APLIC. ANUAL (2) (kg/ha/ano)
- cádmio	1 - 3	20 - 40	0,15
- cobre	50 - 140	1000 - 1750	12,0
- níquel	30 - 75	300 - 400	3,0
- chumbo	50 - 300	750 - 1200	15,0
- zinco	150 - 300	2500 - 4000	30,0
- mercúrio	1 - 1,5	16 - 25	0,1
OBSERVAÇÕES: 1 - Faixa de valores válidos para pH do solo entre 6 e 7. Para os metais Cu, Ni e Zn esses limites podem ser aumentados em 50%, caso o pH do solo seja maior do que 7,0. 2 - Média anual, para um período de 10 anos, podendo ser aplicado de uma só vez.			

Fonte: Adaptado de Matthews (1995)

VIESSMAN e HAMMER (1985) afirmam que, nos Estados Unidos, a essa época, a maior parte do lodo estava sendo disposta no solo, sendo que 3/4 eram utilizados como condicionador de solo, e 1/4, nos aterros sanitários e "monofill". Segundo esses AA., a incineração era onerosa e a disposição oceânica estaria sendo restrita pela legislação daquele país.

Enquanto a CEC propôs a proibição do lançamento de lodos de esgotos ao mar, em toda a Europa, a partir de 1998 (**MATTHEWS, 1992**), desde 1991, essa proibição já existe na legislação norte-americana (**HEMPHILL, 1992**); nos EUA, a regulamentação para lançamento de lodo de esgotos nos solos só foi promulgada em 1993 (**HUNT et al., 1994**). Segundo a **USEPA (1989)**, isso se deu após a ocorrência dos seguintes fatos: em setembro de 1988, o NRDC - "Natural Resources Defense Council" (Conselho de Defesa dos Recursos Naturais dos EUA) moveu um processo judicial contra a USEPA. O NRDC reclamava que a USEPA estava mais de dez anos atrasada na elaboração de regulamentos, referentes à disposição e/ou aproveitamento dos lodos de esgotos municipais; solicitava aos juizes um

juízo sumário, exigindo que esta adotasse regulamentos definitivos, em menos de 1 ano. A audiência foi marcada para janeiro de 1989 e, nessa audiência, a USEPA apresentou um esboço de regulamentos e um plano de ação, onde eram previstos prazos para discussões com a comunidade técnica, científica e demais órgãos interessados, a respeito dos números por ela propostos, números esses baseados nos resultados de pesquisas obtidos pelo "National Sewage Sludge Survey". O plano previa a promulgação dos regulamentos para outubro de 1991.

Esses regulamentos foram publicados pela USEPA, no ano de 1993, através do código conhecido como **40 CFR** ("Code of Federal Regulations"), **parte 503**, que impôs os padrões norte-americanos para uso ou disposição de lodos produzidos por ETEs municipais. Foram fixados limites, para dez elementos no lodo e no solo, apresentados na **Tab. 2.2**.

Tab. 2.2 - LIMITES DE POLUENTES NO LODO E NOS SOLOS QUE RECEBEM LODO, NOS EUA.

POLUENTES	COLUNA 1	COLUNA 2	COLUNA 3	COLUNA 4
	CONCENTRAÇÃO MÁXIMA NO LODO (mg/Kg)*	LIMITES DE ACUMULAÇÃO NO SOLO (Kg/ha)**	LIMITES DE APLICAÇÃO ANUAL NO SOLO (Kg/ha)**	CONCENTRAÇÃO MÉDIA MENSAL NO LODO (mg/Kg)*
arsênio	75	41	2,00	41
cádmio	85	39	1,90	39
cromo	3.000	3.000	150,00	1.200
cobre	4.300	1.500	75,00	1.500
chumbo	840	300	15,00	300
mercúrio	57	17	0,85	17
molibdênio	75	18	0,90	18
níquel	420	420	21,00	420
selênio	100	100	5,00	36
zinco	7.500	2.800	140,00	2.800
OBSERVAÇÕES:				
* em mg do poluente por kg de lodo (em bases secas)				
** em kg de poluente por ha de solo (em bases secas)				

Fonte: Adaptado da USEPA (1993)

De forma resumida, devem ser adotados os seguintes procedimentos, para aplicação dos limites estabelecidos na **Tab. 2.2.**:

- Se a concentração de qualquer elemento, contido num lodo, exceder os limites fixados na COLUNA 1, este não deve ser aplicado ao solo.
- Em solos agrícolas, florestas, em locais de acesso público, ou na recuperação de áreas degradadas, a aplicação do lodo não deve provocar o acúmulo de elementos poluentes no solo. Deve-se atentar para que não venham a exceder os valores apresentados na COLUNA 2. Para os tipos de aplicação citados, os teores limites de poluentes no lodo, são fixados pela COLUNA 4.
- Para as aplicações em gramados ou jardins domiciliares, ou ainda para os lodos vendidos ou doados (embalados em sacos ou containers), também devem ser obedecidos os teores limites apresentados na COLUNA 4. Nesses casos, deve-se ainda obedecer aos limites anuais de aplicação, fixados na COLUNA 3.

A **USEPA (1983)** recomenda que, antes de se decidir pela utilização de um determinado lodo no solo, seja realizada uma campanha de ensaios no lodo, com um ou dois anos de duração, o que evitaria eventuais sazonalidades, que poderiam ocorrer em campanhas isoladas. Os dados apresentados nas **Tab. 2.3 e 2.4** resultam de um levantamento feito em oito estados norte-americanos e atestam essa preocupação. Pode-se observar que, na maioria dos casos, os valores extremos das faixas, apresentados na **Tab. 2.3**, ultrapassam os limites fixados na **Tab. 2.2**.

KHRAMENKOV (1990), apresentou alguns comentários e dados referentes à cidade de Moscou, capital da extinta União Soviética, na época em que sua população era de 9 milhões de habitantes. As redes de esgotos municipais recebiam uma vazão de aproximadamente 6 milhões de m³/dia, sendo 77 % de origem doméstica e 23 % de origem industrial, totalmente tratados em 3 ETEs. A produção de lodo era de aproximadamente 1.900 tds/dia (toneladas de sólidos secos por dia), sendo 30 % desidratado mecanicamente e 70 % em leitos de secagem. Os leitos de secagem ocupavam uma área de 800 ha e estariam sendo

substituídos pela desidratação mecânica. Grande parte desse lodo era anteriormente utilizado na agricultura. Porém, devido à presença de metais pesados que começaram a ser detectados no lodo, essa utilização estaria sendo limitada. Os metais pesados seriam decorrentes do lançamento de efluentes industriais nas redes, particularmente os efluentes de galvanoplastia. Segundo o A., esse tipo de atividade industrial lançava seus efluentes nas redes, contendo soluções de sais metálicos, com uma vazão estimada em cerca de 440 m³/dia (aproximadamente 0,007 % do total).

Tab. 2.3 - POLUENTES ENCONTRADOS NOS LODOS DE ESGOTOS MUNICIPAIS (faixa de variação em mg do poluente por kg de lodo, em peso seco)

POLUENTES	EM LODOS DIGERIDOS ANAEROBIAMENTE (mg/kg)	EM LODOS DIGERIDOS AEROBIAMENTE (mg/kg)
- arsênio	10 a 230	-
- cádmio	3 a 3.410	5 a 2.170
- cromo	24 a 28.850	10 a 13.600
- cobre	85 a 10.100	85 a 2.900
- chumbo	58 a 19.730	13 a 15.000
- mercúrio	0,5 a 10.600	1 a 22
- molibdênio	24 a 30	30 a 30
- níquel	2 a 3.520	2 a 1.700
- zinco	108 a 27.800	108 a 14.900

Fonte: Adaptado da USEPA (1983)

A **ANGLIAN WATER**, entidade que administra as atividades relacionadas com os sistemas de água e esgotos no Reino Unido, publicou, em 1979, um manual para utilização do lodo de esgoto na agricultura. Esse manual já está na 2ª revisão (1991) e preconiza os cuidados que se deve ter na utilização do lodo em solos agrícolas.

STEINLE (1993) expõe a situação da aplicação de lodos de esgotos municipais em áreas rurais da Alemanha, onde as pequenas ETEs, após a degradação do lodo (geralmente aeróbias), mantinham o lodo líquido armazenado em tanques, até que os fazendeiros viessem buscá-lo, para aplicação em solos agrícolas. Segundo esse A. estaria

havendo, nas últimas décadas, parcial desinteresse dos fazendeiros, diminuindo essa utilização. Isso obrigou algumas comunidades a fazer a desidratação mecânica do lodo, para posterior aplicação em solos agrícolas e até mesmo em aterros sanitários.

Tab. 2.4 - OUTRAS SUBSTÂNCIAS E NUTRIENTES PRESENTES NOS LODOS DE ESGOTOS MUNICIPAIS

SUBSTÂNCIAS E NUTRIENTES	EM LODOS DIGERIDOS	EM LODOS DIGERIDOS
	ANAEROBIAMENTE	AEROBIAMENTE
C orgânico (%)	18,0 a 39,0	27,0 a 37,0
N total (%)	0,5 a 17,6	0,5 a 7,6
N-NH₄ (mg/kg)	120,0 a 67.600,0	30,0 a 11.300,0
N-NO₃⁻ (mg/kg)	2,0 a 4.900,0	7,0 a 830,0
P total (%)	0,5 a 14,3	1,1 a 5,5
S total (%)	0,8 a 1,9	0,6 a 1,1
K (%)	0,02 a 2,6	0,08 a 1,1
Na (%)	0,01 a 2,2	0,03 a 3,1
Ca (%)	1,9 a 20,0	0,6 a 13,5

Fonte: Adaptado da USEPA (1983)

LOWE (1993) mostra preocupação com o destino final do lodo em Hong Kong, em função do crescimento de sua produção. Fala de estudos para disposição em aterros, em função da distância da cidade até as regiões agrícolas.

Nas publicações norte-americanas mais recentes (**USEPA, 1989; HUNT et al., 1994**), aparece a palavra "**BIOSÓLIDOS**", para o lodo de esgotos municipais e produtos assemelhados.

Na cidade de São Paulo, numa estação de tratamento de esgotos, em nível primário, a ETE-Leopoldina, pertencente à SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, foi iniciado, na década de 70, um projeto piloto para produção de agregados leves para concreto, a partir do lodo de esgotos (**BROSCH, ALVARINHO e SOUZA, 1976**).

Posteriormente, para a mesma ETE, foi idealizado um projeto que previa a utilização conjunta de alguns equipamentos utilizados na fabricação de agregados leves, para a produção de fertilizantes organo-minerais (SANTOS, 1989). Essa estação foi posteriormente desativada, em função de um novo plano que prevê o tratamento de esgotos, em nível secundário, incluindo toda a RMSP - Região Metropolitana de São Paulo. Os dois projetos citados acabaram sendo também, pelo menos temporariamente, desativados.

Em 1993, a SABESP contratou o planejamento para a RMSP, em termos de disposição do lodo resultante do tratamento de esgotos. A RMSP ocupa 17% da área estadual, reunindo 38 municípios, entre eles o município de São Paulo. Estima-se que a população atual (1995), esteja por volta de 17 milhões de habitantes. Prevê-se tratar os esgotos dessa região, através de cinco estações de tratamento (Tab. 2.5). Todas as 5 ETEs tratarão seus esgotos pelo processo de lodos ativados convencionais. A digestão do lodo será anaeróbia, com exceção da ETE Parque Novo Mundo, cujo projeto prevê a substituição dos decantadores primários por peneiras rotativas e dos digestores por condicionamento térmico seguido de desidratação mecânica para o lodo secundário flotado. A ETE São Miguel também terá condicionamento térmico do lodo, seguido de desidratação mecânica. Nas ETEs Barueri, Suzano e ABC, a desidratação do lodo digerido será feita mecanicamente através de filtros prensa de placas. (SABESP, 1993).

Apenas as ETEs Barueri (em operação desde 1984) e Suzano (em operação desde 1980) podem apresentar alguns dados de produção de lodo mais confiáveis. As demais estão em construção, sendo os valores da Tab. 2.5 são apenas estimativos.

Segundo dados da SABESP (1993), somente na ETE Barueri, durante o ano de 1991, foram produzidas, em média, 152 toneladas por dia de tortas de lodo digerido e desidratado, com teor de sólidos médio de 38% (desvio padrão de 2%), correspondentes a uma vazão média afluente à ETE de $3,98 \text{ m}^3/\text{s}$. Nos oito primeiros meses de 1992, a média de produção diária foi de 168 t/dia de torta digerida e desidratada, sendo que um volume superior a 150 mil toneladas de lodo está sendo acumulado no terreno e nas vizinhanças da ETE, aguardando definição dos estudos para solução do problema. A ETE Suzano, com capacidade para $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, mas operando com apenas $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$, por insuficiência de ligações aos

interceptores do seu sistema de coleta, já acumulava, na mesma época, cerca de 55 mil toneladas de lodo.

Tab. 2.5 - ESTIMATIVA DE VAZÕES TRATADAS (em m³/s) E DE PRODUÇÃO DE LODO (em t/dia de sólidos secos), NAS ETEs, PARA A R.M.S.P.

E T E	PREVISÕES PARA OS ANOS DE							
	1 9 9 4		1 9 9 7		2 0 0 0		2 0 0 5	
	vazões	lodo	vazões	lodo	vazões	lodo	vazões	lodo
Barueri	9,5	141	14,3	212	24,0	316	28,5	422
ABC	3,0	63	4,5	68	6,0	125	8,5	129
Pq.Novo.Mundo	2,5	62	5,0	125	7,5	187	7,5	187
S.Miguel	1,5	31	3,0	63	4,5	94	6,0	125
Suzano	1,5	22	1,5	22	1,5	22	1,9	28
T O T A I S	18,0	319	28,3	490	43,5	744	52,4	891

Fonte: SABESP (1993)

Segundo os estudos da **SABESP (1993)**, a RMSP deverá apresentar uma população estimada em 25 milhões de habitantes, no ano 2005. Sendo tratados os esgotos, conforme previsto na Tab. 2.5, a produção total estimada de lodo seria de 891 tds/dia. Se considerarmos um teor de umidade da torta desidratada em torno de 60%, esse número sobe para cerca de 1937 t/dia, ou algo em torno de 322 viagens de caminhões com 6 t de capacidade. Por outro lado, os europeus utilizam um valor estimativo de produção de lodo, da ordem de 30 kg anuais de sólidos secos por habitante, ou cerca de 82 gramas diárias por habitante (**VINCENT e CRITCHLEY, 1984**). Se essa estimativa fosse aplicada aos 25 milhões de habitantes previstos para o ano 2005 na RMSP, ter-se-ia uma produção de lodo da ordem de 2.050 tds/dia, ou seja, mais do que o dobro da quantidade prevista.

Com esses números, não se pretende contestar os valores de produção de lodo, apresentados na **Tab. 2.5**, mas sim demonstrar que os volumes de produção de lodo são significativos e podem vir a ser ainda maiores do que o previsto. De qualquer maneira, seja qual for o número final de produção de lodo, o problema é bastante sério. O nível de metais no lodo e a distância de transporte talvez venham a ser empecilhos para aplicação desse lodo em áreas agrícolas; além disso, há dificuldades na definição de áreas disponíveis para disposição em “monofill”.

2.2 - Tratamento prévio do lodo para sua utilização e/ou disposição

2.2.1 - Os processos de estabilização do lodo

É consenso, na bibliografia consultada, que o lodo fresco é altamente putrescível. O lodo, nesse estado, desenvolve rapidamente forte odor desagradável, possui alta percentagem de microrganismos, com probabilidade de ocorrência de patogênicos. Por esses motivos, o tratamento complementar do lodo é uma prática bastante utilizada.

Segundo **HAMER e ZWIEFELHOFER (1986)**, o lodo fresco é de constituição bastante complexa, e suas principais frações constituintes são:

- sólidos não biodegradáveis;
- sólidos biodegradáveis de origem biológica (biomassa);
- sólidos biodegradáveis de origem não biológica;
- compostos solúveis biodegradáveis;
- compostos solúveis não biodegradáveis;
- compostos imiscíveis biodegradáveis (fração biodegradável de óleos e graxas)
- compostos imiscíveis não biodegradáveis (frações não biodegradáveis de óleos e graxas);
- compostos biodegradáveis adsorvidos;
- compostos não biodegradáveis adsorvidos.

Nas estações de tratamento de esgotos convencionais, com unidades de lodos ativados ou mesmo filtros biológicos, os sólidos sedimentados nos decantadores primários e secundários são chamados respectivamente de **lodos frescos primários e secundários** (METCALF e EDDY, 1991). Removidos dos decantadores, normalmente esses lodos passam por um tratamento (digestão), para diminuir a putrescibilidade e o mau odor, antes de sua disposição final. Antes da digestão, é comum a instalação de unidades de espessamento do lodo, visando à diminuição de volumes. Nas ETEs que fazem o tratamento biológico através de lodos ativados convencionais, o espessamento é feito através de uma nova unidade de sedimentação, para o lodo primário, e flotação ou centrifugação, precedidas de condicionamento químico, para o lodo secundário. Quando utilizados os filtros biológicos, o lodo secundário costuma ser recirculado para um ponto anterior ao decantador primário e acaba sedimentando juntamente com esse tipo de lodo (VIESSMAN e HAMMER, 1985).

O processo anaeróbio de digestão do lodo resulta em menor custo de energia, tem como subproduto o gás metano (que algumas vezes é aproveitado), apresenta melhor "performance" na destruição de organismos patogênicos, quando comparado com o lodo degradado aerobiamente (PIKE e DAVIS, 1984). Provavelmente sejam esses os motivos para que seja mais utilizado em todo o mundo, principalmente nas grandes instalações (VINCENT e CRITCHLEY, 1984; BRUCE e FISHER, 1984; MATTHEWS, 1992).

No entanto, existem variantes simplificadas do processo de lodos ativados (valos de oxidação, carrossel, batelada), cuja principal característica, em se tratando do lodo, é a sua degradação aeróbia, que ocorre no próprio reator, através de aeração prolongada. Nas pequenas e médias instalações, os processos de aeração prolongada tornam-se viáveis e têm sido muito utilizados (SOBRINHO, 1993; KAMYAMA, 1989, 1990 e 1992; STEINLE, 1993).

Após passar por um desses processos, o lodo é classificado como "**digerido**". Segundo VIESSMAN e HAMMER (1985), o lodo digerido anaerobiamente apresenta-se como um líquido denso, de cor escura, com teor de sólidos de 6 % a 12 %. Pode ser desidratado mecanicamente, desde que precedido de condicionamento químico, ou em leitos de secagem. O lodo digerido aerobiamente tem cor marrom-escura, é floculento, relativamente

inerte, com teor de sólidos de 0,5 % a 2,5 %. Essa suspensão é geralmente intumescida e de difícil espessamento, criando problemas para desidratação mecânica, podendo, no entanto, ser desidratada em leitos de secagem ou lançado no solo.

A finalidade da desidratação é a diminuição dos volumes de transporte, para a disposição final. O lodo após desidratação é chamado de torta ("cake"). O teor de umidade da torta varia de 60% a 85%, de acordo com o método de desidratação utilizado (**VISSMAN e HAMMER, 1985**).

Algumas cidades vêm optando por uma redução mais drástica de volumes, através da incineração da torta, transformando-a em cinzas. Entretanto, a incineração apresenta um custo geralmente muito alto (**GROVE, 1978; VISSMAN e HAMMER, 1985 e MATTHEWS, 1992**).

Com relação à degradação aeróbia do lodo, o processo de lodos ativados por batelada poderá, aos poucos, alterar o panorama exposto, principalmente nos países que ainda não implantaram seus sistemas de tratamento de esgotos. Nesse processo, a sedimentação do lodo é feita no próprio reator, após cada período de enchimento do tanque e de aeração. O lodo sedimentado vai sendo retido no reator, e uma parte dele é descartada periodicamente. Ocorre a degradação aeróbia do lodo, por aeração prolongada. Com esse tipo de tratamento eliminam-se várias unidades operacionais (decantadores primários e secundários; unidades de recalque para retorno de lodo, espessadores e digestores de lodo), tornando o processo interessante do ponto de vista de custos de implantação e operação. É também o processo mais fácil de ser automatizado (**KAMIYAMA, 1989, 1990, 1992**).

Outro processo que faz a degradação aeróbia do lodo, por aeração prolongada, é o **Valo de Oxidação**. Foi desenvolvido em 1956, por Aale Pasveer e colaboradores do TNO (Instituto de Pesquisas e Saúde Pública da Holanda). Visava à simplificação do processo de lodos ativados para aplicação em pequenas comunidades (até 5.000 habitantes). Uma variante do Valo de Oxidação é o Sistema Carrossel, proposto para populações equivalentes a até 150.000 habitantes (**AZEVEDO NETTO e HESS, 1970; GONDIM, 1976**).

Segundo **VISSMAN e HAMMER (1985)**, para se fazer a degradação aeróbia do lodo fresco, este deve permanecer sob aeração por um período mínimo de 10 dias

(para temperatura ambiente de 20^o C) ou 20 dias (a 10^o C). A redução dos sólidos suspensos voláteis (SSV), nessas condições, estaria na faixa de 30 % a 50 % e o lodo digerido poderia ser disposto sem provocar odores desagradáveis, nem outros problemas relacionados com vetores de atração (presença de moscas, ratos etc.), nos locais de disposição. A aeração prolongada (com idade do lodo entre 15 e 30 dias) satisfaz essa condição, mas, segundo os AA., produz um lodo com certas dificuldades de sedimentação nos decantadores. A concentração de sólidos estaria na faixa de 1 a 2 % (2,5 % como concentração máxima obtida, num sistema bem operado). Ainda segundo esses AA., a dificuldade de sedimentação desse tipo de lodo freqüentemente cria problemas na disposição de grandes quantidades, uma vez que a desidratação é também mais difícil, sendo o leito de secagem o melhor método para desidratação.

A estabilização aeróbia do lodo, pela oxidação da matéria orgânica, gera basicamente CO₂, H₂O e sais minerais. No entanto, segundo **PIKE e DAVIS (1984)**, muitos dos sólidos orgânicos, resultantes dessa estabilização, são ainda compostos por células biológicas (biomassa) que resistiram à degradação. Nestas condições, mesmo o lodo, tido como digerido, não estaria completamente estabilizado.

2.2.2 - Métodos de medida da estabilidade do lodo

2.2.2.1 - Generalidades

A estabilização do lodo tem sido definida das mais diversas maneiras, não se tendo chegado ainda a um consenso. Para alguns, o lodo estaria estabilizado quando seus componentes orgânicos estivessem convenientemente degradados, tanto aeróbia quanto anaerobiamente. Modernamente, alguns profissionais, atuando na compostagem do lodo, afirmam que a estabilização é completada através de processos nos quais os componentes orgânicos do lodo são rapidamente decompostos e convertidos em um material coloidal, ligno-proteico e humificado, processo esse acompanhado do desaparecimento dos organismos

patogênicos, ou então, em que estes tenham se tornado não efetivos (**HARTENSTEIN, 1981**).

BALMER e KAFFEHR (1983) afirmam que, o estudo da estabilidade do lodo carece ainda de elementos fundamentais. Um grande número de parâmetros, relacionados com a estabilização do lodo, estariam sendo determinados sem, no entanto, ter sido definida ainda qualquer padronização. Segundo os AA., esses parâmetros poderiam ser classificados em três categorias:

- **parâmetros químicos:** relacionados com os objetivos dos processos de estabilização; por exemplo, redução das substâncias causadoras de odor e de produção de gás sulfídrico;
- **parâmetros físicos:** relacionados com as propriedades do lodo; por exemplo, teor de umidade e perdas de matéria orgânica, por aumento de temperatura;
- **parâmetros biológicos:** relacionados com a atividade dos microrganismos do solo sobre o lodo; por exemplo, os testes respirométricos.

BRUCE e FISHER (1984), da mesma forma, afirmam que "a estabilidade do lodo não pode ser medida por métodos padronizados aceitos universalmente, como é o teste da DBO para a estabilidade de efluentes líquidos". Segundo esses AA., a situação torna-se complicada, uma vez que o critério de estabilidade irá variar com o tipo de método de estabilização empregado. O odor seria o critério geral mais relevante, porém a sua medição é subjetiva, cara e de difícil interpretação. Alguns AA. citam as variações da relação carbono/nitrogênio como um indicativo de estabilidade do lodo, visto que esta tenderia a diminuir com a decomposição. No entanto, segundo **HARTENSTEIN (1981)**, os lodos apresentam relações carbono/nitrogênio que já se aproximam dos valores característicos do húmus. Na opinião desse A., fica claro que a escassez de matéria orgânica ou a riqueza de matéria mineral (e não a relação carbono/nitrogênio) é que seriam características essenciais de um lodo estabilizado.

Para a utilização do lodo na agricultura, várias características de qualidade do lodo têm sido monitoradas, em especial aquelas que visam à redução de patogênicos e o

controle do teor de metais, em vez de se preocupar apenas com o controle de odor. Informam **BRUCE e FISHER (1984)** que, na Grã-Bretanha, o Departamento de Meio Ambiente - Conselho Nacional da Água (DOE/NWC) e, nos Estados Unidos, a USEPA especificam, como critério para uma adequada degradação, a fração de sólidos voláteis do lodo destruídos durante o processo de degradação (em percentagem). Ainda segundo esses AA., para lodos degradados aeróbia ou anaerobiamente, a relação entre os teores de sólidos voláteis e sólidos totais "SV/ST" usualmente é reduzida de um valor médio de 0,75 no lodo fresco para cerca de 0,60 em um lodo bem digerido, devido à oxidação da matéria orgânica. O maior problema, ao se tentar uma classificação simplificada desse tipo, é que uma mudança na composição do lodo fresco (por exemplo, uma maior percentagem de lodos biológicos secundários) pode afetar os números acima expostos, considerados normais para um lodo bem digerido, e, por esse motivo, não se deve utilizá-los como medida padrão para verificar a estabilidade.

Segundo **PIKE e DAVIS (1984)**, um lodo poderia ser considerado como convenientemente estabilizado, através dos processos aeróbios e anaeróbios, quando aproximadamente 40% dos sólidos voláteis tivessem sido oxidados. Segundo **BRUCE e FISHER (1984)**, valores menores do que 40% podem ocorrer se o lodo a ser digerido for principalmente lodo secundário. A fração de sólidos voláteis destruídos nos sistemas aeróbios de degradação do lodo, é sempre menor que 40 %, mesmo com completa degradação; para os sistemas anaeróbios esses valores poderiam variar entre 40% e 50%. Outro aspecto ressaltado por esses AA. é que a presença de nitratos, em um lodo degradado aerobiamente, após estocagem, poderia ser indicativo de estabilidade.

Pode-se concluir que o lodo digerido, apesar de ter diminuído o odor, em relação ao lodo fresco, ainda não está completamente estabilizado, o que é caracterizado por uma certa atividade biológica. Pode apresentar ainda uma grande quantidade de microrganismos e, dentre esses, há probabilidade de ocorrência dos patogênicos, que são preocupantes nos casos em que a aplicação é feita em pastagens ou mesmo em solos agrícolas, utilizados na produção de certos alimentos, consumidos "in natura" (principalmente frutas, verduras e legumes).

2.2.2.2 - Método do DTA - "Differential Thermal Analysis"

BALMER e KAFFEHR (1983) apresentaram o método denominado DTA, como uma tentativa de caracterizar e medir a estabilidade do lodo. Com esse teste, os AA. procuraram comparar, por exemplo, os termogramas obtidos para amostras de lodo fresco, com termogramas obtidos para amostras de lodo submetido a diversas idades de compostagem. Com isso pretendiam verificar a diferença entre os diversos termogramas obtidos. Os resultados mostraram uma certa tendência de achatamento da curva (diferencial menor) para as idades de compostagem mais avançadas. Apesar de verificarem essas e outras tendências, a partir das curvas obtidas, afirmaram que era cedo para estabelecer quaisquer conclusões mais definitivas, a respeito da utilização desse método.

2.2.2.3 - Método do ATP (trifosfato de adenosina)

Esse método, para medida da estabilidade do lodo, foi citado por **HARTENSTEIN (1981)** e é feito através da medida da concentração de ATP nas cinzas do lodo. Segundo esse A., o método ATP baseia-se no seguinte princípio: o lodo fresco típico, ou seja, aquele recentemente liberado dos tanques de sedimentação primários e secundários, contém de 40 a 70% de matéria orgânica. Uma grande percentagem desse material é composto por biomassa (principalmente os lodos secundários), rica em ácido nucleico. O menor organismo, com cerca de 1 μm de diâmetro (10^{-6} m), pode ser composto por 26% de ácidos nucleicos. Considerando os organismos maiores, com 10 a 100 μm , esse valor estaria por volta de 5% ou mais. A medida do decréscimo dos valores de ATP, ao longo do tempo, pode vir a ser um indicador bastante sensível e específico da taxa de decomposição do lodo, visto que as bactérias e fungos são os últimos agentes do processo de decomposição heterotrófica, e sua redução em massa coincide com a diminuição da matéria orgânica instável.

2.2.2.4 - Respirometria

O ensaio de respirometria é utilizado para avaliar a atividade microbiológica de um solo, através da medida do CO_2 gerado no processo de degradação da matéria orgânica. Baseia-se no princípio de que há uma correlação direta entre a geração de CO_2 e a degradação da matéria orgânica num solo, pela ação dos microrganismos presentes. Quando, num determinado solo, é adicionada uma certa quantidade de matéria orgânica, há um crescimento da massa biológica e, conseqüentemente, aumenta a geração de CO_2 , como resultado da atividade desses microrganismos. À medida que a quantidade de matéria orgânica vai diminuindo, o número de microrganismos também diminui, e a geração de CO_2 sofre um decréscimo.

O teste respirométrico permite estimar o tempo para a estabilização de um resíduo orgânico, quando este é lançado no solo. Além disso, podem-se obter, através desse teste, as taxas de aplicação mais convenientes do resíduo num determinado solo, em cada caso. Pode-se detectar, ainda, uma possível toxicidade dos elementos presentes no resíduo, quando estes afetam os microrganismos do solo.

BARTHA e PRAMER (1965) apresentaram o frasco biométrico por eles desenvolvido, descreveram o método de ensaio e os resultados de um estudo comparativo de geração acumulada de CO_2 , durante um período de 19 dias, utilizando em cada frasco 50 g de solo, ao qual foram adicionados 500 ppm das seguintes substâncias: 2,4 ácido diclorofenoxiacético (2,4 - D); glicose; azida e fenol. A mistura solo-fenol apresentou, até o 7º dia, menor geração de CO_2 do que o solo-controle, passando posteriormente a uma maior geração, atingindo cerca de 143 mg de CO_2 , ao final dos 19 dias. A mistura solo-glicose apresentou maior geração de CO_2 do que o solo-controle, desde o 1º dia de incubação, atingindo cerca de 104 mg de CO_2 , aos 19 dias. A mistura solo-2,4-D apresentou valores ligeiramente superiores aos do solo-controle, até o 15º dia, quando então passou a apresentar valores semelhantes aos do solo-controle, ambos atingindo cerca de 88 mg de CO_2 , aos 19 dias. A mistura solo-azida apresentou a mais baixa geração de CO_2 , desde o 1º dia de

incubação, atingindo um total de apenas 10 mg de CO₂, aos 19 dias, sugerindo que essa substância apresenta toxicidade aos microrganismos do solo.

FULLER e WARRICK (1985), descrevendo o ensaio de respirometria, afirmam: o CO₂ gerado numa amostra de 100 gramas de solo virgem e em outras amostras, com diferentes concentrações do resíduo estudado, pode ser determinado, em intervalos regulares de 14 dias. O teor de umidade do solo é levado a 60 % da capacidade de campo e os solos são incubados em frascos biométricos. O CO₂ é absorvido por um padrão álcali (NaOH - 0,1 N), contido num tubo conectado ao frasco de reação que contém o solo. Periodicamente o álcali do tubo é retirado e titulado, logo após uma operação em que o carbonato é precipitado com cloreto de bário neutro em excesso (20%), usualmente em torno de 20 ml. Para a titulação usa-se o ácido clorídrico (HCl - 0,1 N). No recipiente é colocada uma nova quantidade de álcali, para possibilitar a próxima medição.

Deve-se salientar que a normalização existente no Brasil, para o ensaio de respirometria, foi preparada, quase que exclusivamente, para a degradação de resíduos industriais, em especial aqueles de características oleosas, das refinarias de petróleo. Esse ensaio é utilizado como um dos elementos controladores do processo de disposição e tratamento desse tipo de resíduo no solo, denominado "landfarming". Sabe-se que os resíduos contendo hidrocarbonetos possuem características diferentes dos lodos de esgotos domésticos, requerendo-se algumas adaptações para a realização desse ensaio.

Existem algumas diferenças, entre a descrição apresentada por **FULLER e WARRICK (1985)** e a normalização brasileira. O Método de Ensaio L-6.350 da **CETESB (1990)**, no qual está sendo baseado o projeto de Norma da **ABNT-01.603.007 (no prelo - 1993)**, cita que a medida do gás carbônico produzido pode ser efetuada em sistemas de análise em fluxo contínuo ou em sistemas fechados. Os sistemas de fluxo contínuo caracterizam-se por câmaras de incubação, por onde se faz passar um fluxo de ar isento de CO₂, sendo o ar efluente borbulhado em solução alcalina para remover o CO₂ produzido pela respiração dos microrganismos do solo. Esse CO₂ seria, então, medido em sistema contínuo, por método químico.

NOWAKOWSKI e ZITRIDES (1992) apresentam, em escala comercial, diversos tipos de respirômetros eletrolíticos (de fluxo contínuo), tanto para efluentes líquidos como para solos. Esses respirômetros são geralmente acoplados a microcomputadores e apresentam a vantagem de uma resposta mais rápida e precisa, além do armazenamento e compilação automática dos dados. No entanto, esses equipamentos apresentam um preço elevado (cerca de US\$ 40.000,00 a US\$ 60.000,00, segundo **CASARINI, 1994**).

Já o respirômetro de **BARTHA e PRAMER (1965)**, detalhado na norma **CETESB - L-6350 (1990)**, é um sistema fechado, constituído de duas câmaras interligadas. Em uma das câmaras, um “erlenmayer” de 250 ml, é colocado o resíduo misturado com o solo, e na outra câmara, a solução alcalina (é recomendada a utilização de KOH). O respirômetro de Bartha tem sido utilizado, pela sua simplicidade e baixo custo (cerca de US\$ 40,00 a unidade).

MOREL e GUCKERT (1983) realizaram ensaios de respirometria da mistura solo-lodo, comparando amostras de dois tipos diferentes de lodos de esgotos (**Tab. 2.6**). Em um dos tratamentos foi utilizado um lodo degradado aerobiamente e sem nenhum condicionamento químico (**TRATAMENTO 01**). No outro, um lodo digerido anaerobiamente e condicionado com cal e cloreto férrico para a desidratação (**TRATAMENTO 02**). Foi feito também o acompanhamento da geração de CO₂ no solo de referência (**SOLO-CONTROLE**). As misturas solo-lodo (**TRATAMENTOS 1 e 2**), bem como o solo de referência (**SOLO-CONTROLE**), foram incubados em triplicata, a 28°C.

Os AA. buscavam, nesse estudo, fazer comparações entre as características dos lodos tratados com cal e lodos não tratados com cal. Concluíram, ao final do experimento, que, apesar dos dois tipos de tratamento apresentarem quantidades finais acumuladas do carbono liberado, praticamente iguais, estas apresentaram sensíveis diferenças, nas quantidades parciais de CO₂ gerado ao longo do período de incubação. O lodo anaeróbio, estabilizado com cal e cloreto férrico (**TRATAMENTO 02**) apresentou, nos primeiros 30 dias, uma mais baixa produção de CO₂ do que a verificada no **TRATAMENTO 1**. Após esse período passou a apresentar uma evolução maior e mais uniforme do que a da outra amostra. Provavelmente, na amostra com cal, houve necessidade de um período de adaptação dos microrganismos, para que pudessem iniciar o processo de degradação dos resíduos orgânicos adicionados.

Tab. 2.6 - EVOLUÇÃO DA GERAÇÃO DE CO₂ AO LONGO DO PERÍODO DE INCUBAÇÃO (para lodos de esgotos municipais)

TEMPO DE INCUBAÇÃO (dias)	CO ₂ LIBERADO DIARIAMENTE (mg)		
	SOLO CONTROLE	TRATAMENTO 01	TRATAMENTO 02
1	288,00	11,10	9,42
7	1,68	4,14	2,58
14	0,78	1,11	0,99
21	0,96	1,18	1,14
30	1,50	1,95	1,63
62	0,75	0,77	0,85
90	0,67	0,76	0,95
125	0,55	0,54	0,68
182	0,50	0,36	0,54

Fonte: adaptado de MOREL e GUCKERT (1983)

O trabalho de **MOREL e GUCKERT (1983)** foi mais amplo, incluindo testes de campo. No entanto, não foram apresentados, no artigo publicado, maiores detalhes sobre os ensaios de respirometria realizados.

CASARINI et al. (1988) realizaram ensaios de respirometria, utilizando o respirômetro de Bartha (ver Tab. 2.7). Utilizaram solo coletado em um "landfarming" e lodo proveniente do tratamento biológico, contendo resíduos oleosos, de uma refinaria de petróleo. Nessa pesquisa, as amostras foram montadas em duplicata (utilizando apenas 10 g de solo) e incubadas a $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$. Os AA. corrigiram a umidade do solo para 50 % da capacidade de campo em todas as amostras; em algumas delas, o pH foi corrigido com hidróxido de cálcio (CaOH). Em todas, fizeram adição de nutrientes: NH_4NO_3 para suprir de nitrogênio, utilizando a relação carbono:nitrogênio (C:N) de 60:1 e K_2HPO_4 , para suprir de fósforo, numa relação carbono:fósforo (C:P) de 300:1.

As amostras incubadas apresentavam as seguintes características:

- **CONTROLE 1** - 10 gramas de solo com pH natural (em torno de 5), que serviu de controle para o TRATAMENTO 1;

- **CONTROLES 2 e 3** - 10 gramas de solo com pH corrigido para o valor 7, que serviu de controle para os TRATAMENTOS 2 e 3;
- **TRATAMENTO 1** - 10 gramas de solo com pH natural (em torno de 5), misturado com 1 grama de resíduo oleoso contendo cerca de 10,8% de óleos e graxas;
- **TRATAMENTO 2** - 10 gramas de solo com pH corrigido para o valor 7, misturado com 1 grama de resíduo oleoso com 10,8% de óleos e graxas;
- **TRATAMENTO 3** - 10 gramas de solo com pH corrigido para o valor 7, misturado com 2 gramas de resíduo oleoso com 10,8% de óleos e graxas.

Tab. 2.7 - EVOLUÇÃO DA GERAÇÃO DE CO₂ AO LONGO DO TEMPO
(para lodos contendo resíduos oleosos de refinaria de petróleo)

TEMPO INCUBAÇÃO (dias)	VALORES ACUMULADOS DE CO ₂ GERADO (em mg)				
	RESPIRÔMETROS DE CONTROLE		RESPIRÔMETROS DOS TRATAMENTOS SOLO-LODO		
	1	2 e 3	1	2	3
1	5.94	6.60	7.79	8.36	10.43
2	6.60	8.14	9.46	6.25	12.41
3	7.70	9.90	11.44	13.64	16.50
4	8.58	12.10	12.32	15.40	19.80
6	11.00	15.40	16.28	19.58	25.96
8	11.00	15.62	16.59	21.43	32.12
10	11.66	17.60	19.89	27.15	46.86
12	11.66	17.82	20.33	31.24	55.75
14	11.66	18.04	22.66	34.19	64.97
19	11.66	18.04	27.59	41.45	78.41
21	11.66	18.04	28.47	42.24	80.17
25	12.54	18.70	32.78	47.39	86.55
34	14.08	21.34	42.46	57.51	92.84
41	14.30	22.44	47.30	61.16	95.70
50	16.50	24.42	53.24	66.00	99.31
56	18.26	25.30	58.17	70.62	102.52
64	18.48	25.52	60.37	73.70	104.06
78	19.36	25.96	62.79	75.24	105.38
92	20.90	26.40	64.77	78.76	106.70
107	23.76	27.06	66.40	82.37	108.90

Fonte: Adaptado de CASARINI et al. (1988)

Os AA. concluíram que o TRATAMENTO 2 era o mais conveniente. Na aplicação desse tipo de resíduo, leva-se em conta que, basicamente, a matéria orgânica a ser degradada são os óleos e graxas. Nessas condições, o TRATAMENTO 2 resultaria numa taxa de aplicação de resíduo ao solo, de 210 toneladas de resíduo/ha (ou 21 kg de resíduo/m²).

Considerando apenas o teor de óleos e graxas do resíduo, que era de 10,8 %, pode-se considerar uma taxa de aproximadamente 1% (em peso de óleos e graxas por peso de solo), ou cerca de 2,3 kg em óleos e graxas/m². Estimaram, para o TRATAMENTO 2, uma taxa de biodegradação de 33 %, durante o período de incubação. Essa taxa compara o carbono degradável existente no resíduo com o carbono existente no CO₂ total, liberado durante o ensaio de respirometria. Considerou-se que 85% dos óleos e graxas são constituídos de carbono e que apenas esse material é degradável no resíduo a ser lançado ao solo. Salientaram que todos os resíduos que apresentam uma taxa de biodegradação maior ou igual a 30% podem ser, em princípio, tratados em "landfarming".

Somente para estabelecer termos comparativos, o Método de Ensaio CETESB - L.6350 (1990) cita temperatura de incubação de 20^o C. A PETROBRÁS (1991) recomenda temperatura de 30^o C. O projeto de Norma ABNT 01.603.06-007 (1993) estaria fixando definitivamente a temperatura de incubação das amostras biométricas em 28 (±2)^oC. Esta norma recomenda ainda que se preparem as amostras com 50 g de solo, e que as determinações de CO₂, sejam feitas, no início diariamente e, depois, semanalmente, acompanhando a tendência do processo, que é de uma maior degradação inicial.

2.2.3 - Os processos de desidratação do lodo

A desidratação do lodo visa a diminuição dos volumes e, conseqüentemente, dos custos de transporte para a disposição final. O teor de sólidos da torta, após os processos usuais de desidratação (excetuando-se a incineração), estaria na faixa entre 15% e 40% (VIESSMAN e HAMMER, 1985).

2.2.3.1 - Leitos de secagem

Nas pequenas comunidades, a desidratação do lodo tem sido feita nos leitos de secagem, face à maior simplicidade desse processo, quando comparado com os processos mecanizados. Todavia, são bastante conhecidas as principais desvantagens desse processo (VIESSMAN e HAMMER, 1985):

- problemas com a secagem do lodo, durante os períodos chuvosos (em alguns locais, a cobertura dos leitos de secagem pode ser estudada, visando a solucionar esse problema);
- operação manual, na remoção do lodo desidratado, com certos riscos à saúde do operador;
- problemas com a vizinhança por causa de odores desagradáveis;
- comparado aos outros processos de secagem, requer grandes áreas; enquanto nos processos mecanizados consegue-se a secagem de um determinado volume em algumas horas, um ciclo completo em leitos de secagem, que inclui as operações de lançamento do lodo, o tempo de espera para a secagem e a retirada do lodo seco é variável, mas, em média, fica por volta dos 21 dias. Esse tempo depende naturalmente das condições climáticas locais, podendo ser bem maior em condições adversas; isso determina a necessidade de grandes áreas para permitir uma secagem contínua, de acordo com SOBRINHO (1993).

2.2.3.2 - Processos mecanizados de desidratação

A adoção de qualquer dos processos mecanizados, quando comparados com o leito de secagem, praticamente não afeta a eficiência da desidratação, em termos de umidade final da torta. A melhor eficiência da desidratação mecânica está no tempo de desidratação, muito menor do que nos leitos de secagem, requerendo portanto menores áreas para essa finalidade.

No entanto, afirma SOBRINHO (1993) que os processos mecanizados usuais, seja filtro prensa de placas, prensas desaguadoras de esteiras, centrífugas, ou mesmo filtro a vácuo, exigem a utilização de produtos químicos tais como a cal, o cloreto férrico ou

polieletrólitos, no condicionamento do lodo, visando a facilitar a separação líquido-sólido. Isso resulta, muitas vezes, num acréscimo de volumes finais a serem dispostos, bastante significativo. De todos os processos, o filtro prensa de placas é o que apresenta um maior acréscimo nos volumes finais de lodo a ser disposto, pois requer um maior consumo de produtos químicos (cal e cloreto férrico). Por outro lado, tem boa eficiência e relativa facilidade operacional. As prensas desaguadoras de esteiras têm tido boa aceitação. As centrífugas estariam também sendo cada vez mais utilizadas, apesar do alto preço do equipamento. Os filtros a vácuo estariam caindo em desuso, por apresentarem vários problemas operacionais e de manutenção. **KRHAMENKOV (1990)** confirma isso, ao relatar que, em Moscou, esse tipo de equipamento estaria sendo substituído por prensas desaguadoras de esteiras.

Deve-se considerar, na escolha de processos mecanizados, o fato de que, apesar de apresentarem um melhor rendimento no ciclo de desidratação, às vezes só se justificam nas médias e grandes ETEs, pois exigem mão de obra especializada na operação e manutenção do equipamento propriamente dito e a instalação de outros equipamentos para compor a unidade de condicionamento químico do lodo (**SOBRINHO, 1993**).

2.2.3.3 - Tratamento térmico

O tratamento térmico é um processo de condicionamento do lodo fresco, que consiste em aquecê-lo, durante curtos períodos de tempo (geralmente 30 minutos), sob pressão. Esse tratamento apresenta como resultados: a coagulação dos sólidos, a ruptura da estrutura gelatinosa e uma redução da afinidade das fases sólidas e líquidas do lodo. Como consequência, o lodo é esterilizado, praticamente desodorizado, desidratando-se facilmente, através de processos mecânicos, sem necessidade de produtos químicos. Os dois processos mais utilizados: o sistema PORTEUS e o sistema ZIMPRO (**METCALF e EDDY, 1977**).

Segundo esses AA., no sistema **PORTEUS**, o lodo é pré-aquecido pela passagem em permutadores de calor, antes de penetrar no reator. No reator é injetado vapor para elevar a temperatura, que deve permanecer numa faixa de 143°C a 200°C, sob pressões

de 10,5 a 14 kgf/cm² (1,03 a 1,37 MPa). Após um tempo de detenção de 30 minutos no reator, o lodo passa novamente através do permutador, onde troca calor com o lodo que está entrando. Finalmente é conduzido ao decantador. Podem-se, então, através de processos mecanizados de desidratação instalados após um sistema desse tipo, obter uma torta com teores de sólidos da ordem de 40 a 50%.

No sistema **ZIMPRO**, o lodo é tratado de forma semelhante, com uma única diferença: injeta-se ar no reator juntamente com o vapor. As temperaturas estariam na faixa de 150°C a 205°C. As pressões variando na faixa de 10,5 a 21 kgf/cm² (1,03 a 2,06 Mpa).

Em termos de destinação final do lodo, a grande vantagem do tratamento térmico é a completa esterilização do resíduo. Caso os níveis de elementos potencialmente tóxicos "PTE", contidos nesse lodo, situarem-se abaixo dos estabelecidos na **Tab. 2.2**, produz-se o chamado **lodo classe A (USEPA, 1993)**, ou seja, isento de patogênicos e com baixos níveis de PTE, podendo ser utilizados em quaisquer tipos de cultura, sem nenhum problema.

2.2.3.4 - Incineração

A incineração a altas temperaturas é o processo mais drástico de desidratação do lodo. Apresenta, como produto final, basicamente cinzas, reduzindo ao mínimo possível o volume do lodo. No entanto, essas cinzas ainda necessitam de uma disposição adequada em aterros sanitários ou mesmo em "monofill".

Existem vários processos de incineração, sendo o de leito fluidizado um dos mais utilizados (**MATTHEWS, 1992**). Segundo **GROVE (1978)**, a incineração é o processo mais caro de desidratação, pelos seguintes motivos:

- necessita de mão de obra especializada para operação e manutenção;
- apresenta consumo razoável de combustíveis, apesar de que, atualmente, tem sido utilizado o próprio lodo como combustível para manter o processo, devido ao seu razoável calor específico, sendo o combustível utilizado apenas nas partidas;

- utiliza-se da torta já desidratada, visando à redução das dimensões do incinerador e o consumo de combustíveis (não descarta, portanto, os processos anteriormente mencionados de desidratação mecânica);
- apresenta riscos de poluição atmosférica, através do lançamento de fumaça e particulados na atmosfera, sendo necessário que o incinerador seja dotado de um sistema de lavagem e/ou purificação dos gases gerados.

No entanto, algumas grandes cidades estariam caminhando para esse tipo de solução. É provável que isso se deva à grande distância entre essas cidades e as áreas rurais, excesso de EPT nos lodos, somados à carência de áreas disponíveis para disposição do lodo em aterros sanitários ou em "monofill".

2.2.4 - A necessidade de desinfecção do lodo

Segundo **PIKE e DAVIS (1984)**, os principais organismos que poderiam vir a causar doenças em homens e animais, após a aplicação de lodo digerido no solo, são:

- a **Salmonela** - apesar de não haver evidências do incremento de riscos à saúde humana, pela aplicação de lodo de esgotos no solo, existem algumas evidências de que o gado, exposto ao lodo contendo salmonela, pode tornar-se portador da doença causada por esses organismos (salmonelose), em maior grau do que o gado não exposto.
- a **Taenia saginata** (solitária) - é um parasita específico do homem que expele seus ovos juntamente com as fezes, afetando também o gado;
- o **Sarcocystis e Cysticercosis** - segundo os AA., não estaria ainda muito bem avaliada a influência desses organismos.

Ensinam **DINIZ, POITEVIN e MALTESE (1977)** que a "salmonelose" é um termo que nomeia um grupo de afecções provocadas por algumas espécies de salmonelas. São salmoneloses, por exemplo, a febre tifóide, o paratifo "A" e o paratifo "B". Segundo

PIKE e DAVIS (1984), a salmonelose é uma doença muito difundida em homens e nos animais que lhes servem de alimentos. Na Inglaterra e País de Gales foram registradas epidemias em seres humanos, sendo os veículos de transmissão as carnes de animais: galinhas, vacas e porcos, além de alimentos como presunto e leite. Constatou-se que essas epidemias poderiam ter sido melhor controladas, com medidas de maior rigor na higiene com esses alimentos. No entanto, na Grã-Bretanha (com uma única exceção na Escócia), não ocorreram epidemias de salmonelose em animais normalmente utilizados na alimentação humana, nas quais o lodo de esgoto tenha sido especificamente o causador.

O controle de doenças que podem ser transmitidas pela aplicação de lodo ao solo, tem sido objeto de pesquisas. **WATSON (1980)** apresenta um estudo em escala piloto, com aplicação de lodo líquido digerido anaerobiamente ao solo, monitoramento de alguns parâmetros da mistura solo-lodo e medida do NMP (número mais provável) do grupo *Salmonella*. Ficou constatado que a morte destas ocorria após 6 a 7 semanas da mistura do lodo com o solo. No entanto, no mesmo período da morte total da colônia de *Salmonella*, o quadro apresentado pelo A. também mostra uma umidade muito baixa da mistura solo-lodo (cerca de 5,8%) e redução do pH (na faixa de 4,0 a 5,4). Esses fatores podem ter contribuído para a morte desses organismos, pois, segundo **FULLER e WARRICK (1985)**, a faixa de pH entre 5,5 % e 8,5 % é considerada a faixa ótima para os microrganismos do solo, enquanto **BOSSERT e BARTHA (1984)** esclarecem que a água é o principal meio suporte de substrato e de nutrientes essenciais ao processo de alimentação dos microrganismos no solo. Mencionam o valor do teor de umidade de 10% da capacidade de campo do solo, como limite mínimo para o bom andamento do processo.

GODFREE et al. (1984), testando produtos químicos para desinfecção do lodo, concluem que a adição de cal para elevar o pH até 11,5 e após um tempo de contato de 15 minutos, obtém-se 99% de redução no número de salmonelas no lodo. Com relação aos ovos de "*Taenia Saginata*", com um tempo de contato de 4 horas e pH= 12,0 obteve-se 90% de redução na efetividade.

Segundo **PIKE e DAVIS (1984)**, a "*Taenia saginata*" (solitária) é um parasita que tem dois hospedeiros: o homem, que é portador da solitária adulta e o gado que, ao

ingerir os ovos desse verme, passa a ser seu hospedeiro, no estado larval. Segundo **DINIZ, POITEVIN e MALTESE (1977)**, a teníase é uma parasitose intestinal provocada pela infestação por "Taenias", que são vermes pertencentes à ordem dos Cestóides. O corpo desse verme é achatado e articulado em anéis (os proglótides). No grupo dos Cestóides, a "Taenia saginata" é a mais comum. Antes de chegar à fase adulta no intestino do homem, apresenta uma fase embrionária nas vísceras e nos músculos do gado bovino. A contaminação do homem se dá pela ingestão da carne crua desses animais, quando infectados. A contaminação pode-se dar também na ingestão de verduras cruas contaminadas.

O "Cysticercus bovis" infecta a carcaça dos bovinos. É detectado normalmente na inspeção das carnes, nos matadouros e frigoríficos. Pode-se matar esse cisto através do congelamento da carne, ou, quando a infecção é mais generalizada, a carne pode ser condenada. É difícil assegurar que as epidemias causadas nos animais por esse cisto tenham sido causadas pela utilização do lodo, apesar de algumas pesquisas realizadas pelo SCDU - "Scottish Communicable Disease Unit" mostrarem que apenas 14 das 218 epidemias registradas (7%) ocorreram em fazendas que utilizavam lodo no solo (**REILLY, COLLIER e FORBES, 1981** apud **PIKE e DAVIS, 1984**).

2.2.5 - A presença de elementos potencialmente tóxicos no lodo

A presença de elementos potencialmente tóxicos, em níveis excessivos, estaria relacionada com o lançamento de águas residuárias industriais nas redes municipais de esgotos. Esse parece ser um problema mundial e, no Brasil, é muito comum nas médias e grandes cidades. As atividades de galvanoplastia são as mais problemáticas, na medida em que lançam águas contendo altas concentrações de sais de diversos metais utilizados nos processos industriais. Essas indústrias basicamente promovem o recobrimento de proteção de metais com outros metais mais nobres (galvanização, cromeação, cobreamento, prateação, niquelação etc.). Porém outras indústrias, notadamente do ramo metalúrgico, curtumes etc., podem contribuir nesses lançamentos.

Na **Tab. 2.8**, utilizada no Japão, **NOGUCHI e ITO (1992)** apresentam valores limites para diversos elementos potencialmente tóxicos (metais pesados e outras substâncias perigosas), quando da utilização do lodo, como fertilizante.

Nas **Tab. 2.1 e 2.2** foram apresentados valores limites de concentração de elementos potencialmente tóxicos em lodos, quando da sua utilização em solos. Na **Tab. 2.1**, a regulamentação européia, e na **Tab. 2.2**, as restrições norte-americanas impostas pelo código 40 CFR parte 503 **USEPA (1993)**. Os números, apresentados pelos japoneses na **Tab. 2.8**, são mais restritivos do que as normas americanas e européias.

Tab. 2.8 - CONCENTRAÇÕES LIMITES PARA METAIS PESADOS E OUTRAS SUBSTÂNCIAS PERIGOSAS NO LODO, PARA SUA UTILIZAÇÃO COMO FERTILIZANTE (no Japão).

SUBSTÂNCIA	CONCENTRAÇÃO LIMITE	
	(em mg/l)	(em mg/Kg)
- Cádmio	0,3	5
- Cianetos	1,0	-
- Pesticidas fosforados	1,0	-
- Chumbo	3,0	-
- Cromo hexavalente	1,5	-
- Arsênio ácido	1,5	50
- Mercúrio total	0,005	2
- Bifenilas policloradas (PCBs)	0,003	-

Fonte: adaptado de **NOGUCHI e ITO (1992)**

Diversos pesquisadores vêm estudando a mobilidade e outros aspectos relacionados com a aplicação de metais ao solo, quando estes estão presentes em lodos de esgotos municipais. Dentre os vários trabalhos podem-se citar: **BROWN (1975)**, **WILLIAMS e WOLLUM (1981)**; **ROSS, SJOGREN e BARTLETT (1981)**; **EMMERICH et al. (1982)**; **AKHTER (1990)**; **DUDKA e CHLOPECKA (1990)**; **PALAZZO e REYNOLDS (1991)**; **COUILLARD e SHUCAI (1992)**; **LAMY, BOURGEOIS e BERMOND (1993)**.

BROWN (1975) já recomendava que a aplicação de lodos de esgotos municipais no solo ficasse restrita a níveis conservativos, quando o lodo contivesse metais. Segundo o A., essas medidas eram necessárias, até que se obtivessem maiores e mais completas informações a respeito dos efeitos da acumulação dos metais, tais como zinco, cobre, níquel, cádmio, mercúrio e chumbo, após seguidas aplicações de lodo, num mesmo solo. Esse A. alertava também para o problema do excesso de nitrogênio (na forma de nitratos). Se esse elemento é fornecido ao solo, em quantidades que excedem as necessidades das plantas, pode vir a contaminar o lençol freático com nitratos, pois o nitrogênio, nessa forma química, tem alta mobilidade.

Ainda segundo **BROWN (1975)**, os cromatos são muito tóxicos às plantas, enquanto o Cr^{3+} não é. O boro teria comprovada toxicidade para as plantas, no entanto, este seria rapidamente lixiviado através do solo, não se constituindo em problema para as plantas, nas regiões úmidas (porém pode vir a ser um contaminante das águas subterrâneas). Já a excessiva absorção de cádmio, pelas plantas, pode resultar num problema para os seres humanos, por causa da acumulação do elemento na cadeia alimentar. O cobre, o níquel e o zinco são tóxicos às plantas, quando disponíveis no solo em quantidades excessivas. O A. discute ainda a questão da especiação química de maior ou menor mobilidade, através da água livre contida no solo. As formas iônicas teriam maior mobilidade e estariam prontamente disponíveis para as plantas. Todavia, segundo o A. haveria ainda controvérsias. Cita trabalho de outros AA. que estudaram a absorção do zinco pelas plantas, elemento esse que não seguiria exatamente as mesmas tendências dos demais.

WILLIAMS e WOLLUM (1981), estudando o efeito do cádmio sobre as bactérias e actinomicetos presentes no solo, concluíram que deve existir algum aspecto do metabolismo desses organismos adversamente afetado pelo cádmio e, também, que deve existir algum outro mecanismo de tolerância, que só se verifica quando da existência de altos níveis de cádmio no solo. Em resumo, os AA. concluíram que, para baixos níveis de cádmio, os microrganismos seriam afetados, o mesmo não ocorrendo para altos níveis.

ROSS et al. (1981), estudando o comportamento do cromo em solos tratados com esgotos e a sua toxicidade aos microrganismos, afirmam que, aparentemente o Cr^{3+} é

menos tóxico do que o Cr^{6+} , uma vez que o primeiro tem menor mobilidade no solo, não estando prontamente disponível. Já o Cr^{6+} tem mobilidade no solo e penetra rapidamente nas membranas celulares. Uma vez dentro da célula, ele é reduzido, e sua toxicidade provavelmente resultaria da oxidação de componentes celulares. Após a redução para Cr^{3+} , dentro da célula, ele interfere com as funções das proteínas. Citam AA. que observaram mutações em bactérias, na presença do Cr^{6+} .

ROSS, SJOGREN e BARTLETT (1981) concluíram em seu trabalho que o crescimento de todas as bactérias gram-negativas testadas foi quase que completamente inibido sob altos níveis de Cr^{6+} . Com 1 ppm de Cr^{6+} não houve nenhum efeito nas bactérias gram-positivas testadas, enquanto que, para as gram-negativas, a inibição do crescimento foi completa.

EMMERICH et al. (1982) estudaram o movimento de metais pesados (cádmio, cobre, níquel e zinco), em solos tratados com lodos de esgotos, utilizando testes de lixiviação em colunas. Concluíram que, nas condições de teste, não houve significativo movimento de metais no solo. Os AA. comentam, entretanto, a influência dos valores baixos de pH, nessa mobilidade, ou seja, para pHs mais baixos aumentaria a mobilidade.

AKHTER (1990) determinou as quantidades de chumbo, zinco, cobre, níquel, cádmio e ferro no lodo de esgotos produzidos em uma ETE (Bahrain - Tubli - Arábia Saudita), comparando-as com os valores obtidos em solos tratados e não tratados com esse lodo. Verificou que houve uma acumulação significativa do nível de metais no solo tratado com lodo, alertando para os problemas decorrentes dessa acumulação.

DUDKA e CHLOPECKA (1990), estudando os efeitos da presença do Cd, Cr, Ni e Zn, em amostras de solos tratados com lodos de esgotos, concluíram que realmente a mobilidade desses metais e a disponibilidade destes para os microrganismos do solo estão relacionadas com a sua especiação química.

PALAZZO e REYNOLDS (1991) estudaram o efeito da aplicação de um lodo contendo altas percentagens de metais (Cu, Zn, Cr, Pb, Ni e Cd), para melhoramento de um solo altamente ácido (pH = 2,4). Esse solo foi melhorado para permitir o crescimento de vegetação. As taxas de aplicação de lodo foram de 100 tds/ha. O monitoramento de longo

prazo mostrou um decréscimo no nível de metais, tanto no solo quanto nas plantas analisadas, ao longo do tempo. Concluíram que o tratamento foi satisfatório, tendo sido considerado de baixo custo.

COUILLARD e SHUCAI (1992) propuseram modelos cinéticos para a solubilização do cobre, utilizando tanques reatores de mistura completa, num trabalho sobre fixação bacteriana dos metais contidos em lodos de esgotos, quando estes são aplicados em solos agrícolas.

LAMY, BOURGEOIS e BERMOND (1993) estudaram a mobilidade do cádmio no solo, como consequência da aplicação de lodos de esgotos. Citam outros AA., afirmando que as condições de mobilização e/ou imobilização de metais no solo não são fáceis de estabelecer e muito menos devem ser generalizadas. Concluíram em seus estudos que, durante as primeiras semanas seguidas à aplicação do lodo no solo, a quantidade de cádmio na água drenada foi maior do que no solo controle e que esses níveis foram decrescendo ao longo do tempo.

Essa pequena mostra de trabalhos, que não teve a pretensão de cobrir todos os estudos realizados nos últimos tempos, serve apenas para ressaltar a preocupação dos pesquisadores com relação aos metais contidos no lodo de esgotos municipais, quando estes são aplicados em solos (principalmente os solos agrícolas).

Em resumo, pode-se dizer que os metais pesados podem vir a afetar a saúde de homens e animais, tanto através da utilização de águas subterrâneas contaminadas, quanto pela absorção através da cadeia alimentar. As plantas seriam o primeiro elo dessa cadeia, e, a partir delas, pode ocorrer a contaminação direta ou indireta do homem, passando ou não pelos animais.

No entanto, os trabalhos que tentaram ser conclusivos só poderão ser encarados como tal, nas mesmas condições dos ensaios realizados, não se podendo ainda generalizar, na maioria dos casos.

Por exemplo, a maioria dos trabalhos diz que a mobilidade dos metais depende de sua especiação química, ou seja, estes só poderiam ser lixiviados, atingindo os aquíferos subterrâneos, ou mesmo absorvidos pelas plantas e microrganismos, quando na forma iônica

(solúvel). A passagem dos metais para a forma iônica dependeria diretamente do valor de pH do ambiente. Para a maioria dos metais, quanto mais baixo o valor de pH, maior a quantidade de metais sob a forma de íons, com exceção do molibdênio e do selênio, cuja disponibilidade para as plantas aumenta com o incremento do pH (ANGLIAN WATER, 1991).

Percebe-se ainda que o elemento CÁDMIO é um dos mais estudados. Seu efeito no organismo humano estaria relacionado com o ataque ao sistema renal. Segundo **VISSMAN e HAMMER (1985)**, a mobilidade do cádmio é muito improvável sob pHs maiores que 6,0.

Há ainda um outro fator bastante importante relacionado com a mobilidade dos metais que é a CTC - Capacidade de Troca Catiônica do solo (ver **item 2.3.2**). Os íons metálicos podem ser adsorvidos na matriz do solo, dependendo da CTC. Os solos orgânicos, os argilosos e os siltosos apresentam CTC maior que os solos arenosos. A possibilidade de retenção de metais na matriz dos solos com alta CTC é maior. Se, por um lado, isso diminui os riscos de contaminação do lençol freático por metais, por outro lado aumenta a acumulação desses metais no solo, ampliando a possibilidade de serem absorvidos pelas plantas e entrar para a cadeia alimentar de homens e animais (**CETESB, 1991**).

2.2.6 - Utilizações não convencionais para o lodo

2.2.6.1 - Produção de óleo combustível

Segundo a **SABESP (1993)**, o processo para obtenção de óleo combustível, a partir do lodo de esgotos municipais, prevê o aquecimento do lodo desidratado a 450°C, na ausência de oxigênio. Com isso obtém-se a vaporização de cerca da metade do lodo presente. O vapor passa então através de um leito com resíduos de carvão, catalisando reações que convertem os orgânicos do lodo em hidrocarbonetos saturados, principais componentes de todos os combustíveis líquidos.

Essa técnica foi desenvolvida na França há mais de 50 anos e atualmente talvez não esteja sendo muito aplicada por ser financeiramente inviável. O valor do óleo combustível

no mercado internacional é relativamente baixo (há sobra desse produto no mercado, proveniente dos processos de refino do petróleo). No entanto, ainda segundo a **SABESP (1993)**, em Sidney, Cingapura, Hong Kong, Dublin e Tubligen, considera-se a possibilidade de implantar o processo patenteado. A primeira instalação do mundo, em escala industrial, estaria para ser instalada na ETE de Highland Creek, em Toronto (Canadá), visando à transformação de 24 tds/dia de lodo. Em Sidney, a instalação projetada estaria na faixa de 45 a 180 tds/dia de lodo.

2.2.6.2 - Produção de tijolos

Segundo a **SABESP (1993)**, a produção de tijolos, tem sido praticada em escala industrial, com o lodo da ETE de "Fishwater Flats", em "Port Elizabeth" (África do Sul), desde 1979. Mais de 120 milhões de tijolos já teriam sido produzidos, utilizando-se uma mistura de 30% de lodo com argila, numa olaria distante cerca de 15 km da ETE. O contrato de exploração, assinado com a iniciativa privada, era bi-anual no início do empreendimento e, atualmente, renovável a cada 5 anos.

Ainda segundo a **SABESP (1993)**, o tijolo produzido com o lodo da ETE de Fishwater, onde o tratamento é feito através de lodo ativado convencional, utiliza cerca de 45 tds/dia de lodo e é fabricado pelo seccionamento de barras extrudadas, com 20% de umidade neste ponto do processo. O produto supera as resistências à compressão exigidas pelo "South African Bureau of Standards" (de 1986). As resistências, especificadas pelo Bureau, seriam de 17 MPa e 14 MPa, conforme o tipo de tijolo, e têm sido obtidas resistências de 40,7 MPa e 38,3 MPa. As vantagens citadas para o processo seriam: a economia de água; a produção de tijolos mais leves (reduzindo com isso os custos de transporte e possibilitando outros usos onde o menor peso seja interessante); o melhor rendimento operacional da fornalha (devido ao poder calorífico do lodo) e a reutilização da energia térmica da queima dos gases (na secagem prévia dos lodos). Essa secagem é feita através de um tratamento térmico (oxidação por via úmida - Sistema Zimpro).

2.3 - A utilização do lodo para melhoria dos solos

É consenso, entre os AA. consultados, que o lodo de esgoto propicia um melhor condicionamento do solo, podendo ser utilizado para fins agrícolas, na recuperação de áreas degradadas, em parques, jardins, florestas, terrenos marginais ou, em último caso, apenas disposto em aterros sanitários ou em aterros exclusivos para disposição de lodo "monofill".

É consenso também que o lodo deve ser monitorado, notadamente quanto à presença excessiva de metais e outros poluentes tóxicos. Existe também a questão da possível lixiviação do nitrogênio solúvel (nitrato), pelas águas pluviais, contaminando as águas subterrâneas dos aquíferos freáticos, quando este é adicionado ao solo, excedendo às necessidades das plantas.

2.3.1 - A matéria orgânica no solo

Segundo **MEDINA (1975)**, a fração sólida dos solos é formada de substâncias orgânicas e substâncias minerais. As substâncias orgânicas são decorrentes da acumulação de resíduos animais e vegetais, em estado de decomposição ou totalmente decompostos, pela ação de microrganismos. Apesar do teor de matéria orgânica, na parte superficial de alguns solos minerais, apresentar valores numa faixa muito estreita (de apenas 1 a 4% de seu peso), exerce marcada influência nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos. **GROHMANN (1975)** confirma isso, dizendo que "embora os teores de matéria orgânica sejam baixos em solos tropicais, sua presença, mesmo em pequenas quantidades, aumenta a superfície específica média dos solos, pelo elevado grau de divisão de suas partículas". Isso provoca uma mudança na CTC dos solos (ver item 2.3.2). **WUTKE e CAMARGO (1975)** definem a superfície específica como "**a relação entre a área superficial das partículas de solo e a unidade de peso**", sendo geralmente expressa em m^2/g .

De acordo com o teor de matéria orgânica, os solos podem ser considerados orgânicos ou minerais. Os critérios de classificação são arbitrários. Pode ser adotado, segundo **BUCKMAN e BRADY (1964)**, apud **MEDINA (1975)**, o seguinte critério:

- **SOLO ORGÂNICO:** quando apresenta mais de 20 % de matéria orgânica, isto é, mais de 11,5 % de carbono total;
- **SOLO MINERAL:** quando apresenta menos de 20% de matéria orgânica, isto é, menos de 11,5% de carbono total.

Para os solos argilosos ou muito argilosos, ainda segundo **MEDINA (1975)**, pode-se considerar, como limite de classificação, o teor de 30% de matéria orgânica, ou seja 17% de carbono total.

HARTENSTEIN (1981) descreve o húmus como o material orgânico coloidal, de cor escura, encontrado nos solos. Segundo esse A., o húmus não pode ser caracterizado em termos físico-químicos, por não possuir especificamente: peso molecular, ponto de fusão, ponto de ebulição, índice de refração, nem espectro de ressonância ao infravermelho, ao ultravioleta e nem magnética, não podendo ainda ser separado fisicamente dos materiais não degradados, tais como organismos vivos ou moléculas de materiais recalcitrantes, como a lignina, cuja presença reduz a taxa de decomposição orgânica.

Ainda segundo esse A., a humificação da matéria orgânica é um processo de decomposição heterotrófico, que se dá de forma aeróbia. Nesse processo, sob certas condições de temperatura, cerca de 50 a 85% do carbono são liberados na forma de CO_2 , durante os primeiros 6 meses da degradação. Afirma ainda que, na ausência de condições (anaerobiose) que levem à formação de turfas, kerógenos e carvões, a matéria orgânica não acumularia apreciavelmente nos solos.

Informa **JORGE (1975)** que o húmus teria, em média, 58% de carbono, sugerindo a utilização do fator 1,7 que, multiplicado ao carbono dosado, daria aproximadamente o teor de matéria orgânica, ou seja: (% de M.O. = $C \times 1,7$). Afirma ainda que o húmus teria, em geral, cerca de 5% de nitrogênio.

Os efeitos da matéria orgânica nos solos são benéficos. Além de ser uma fonte de carbono, energia e nutrientes para os microrganismos heterotróficos, a matéria orgânica desempenha importante papel sobre as propriedades físicas e químicas dos solos; promove a

agregação das partículas, aumentando a permeabilidade do meio, além de elevar a capacidade de retenção da água necessária e a capacidade de adsorção e troca catiônica (**JORGE, 1975**).

Segundo **CERRI, ANDREUX e EDUARDO (1992)**, "o húmus tem uma função nutricional, na medida em que serve como um reservatório auxiliar, de lenta liberação de nitrogênio, fósforo e enxofre para o crescimento das plantas".

2.3.2 - Adsorção e Troca iônica

REICHARDT (1985) afirma que a fração líquida presente nos solos, chamada pelos agrônomos de "**solução do solo**", é constituída de água, sais minerais e substâncias orgânicas, estas últimas geralmente na forma coloidal. Na fração sólida dos solos, tanto as argilas quanto a matéria orgânica em decomposição, os óxidos, a superfície das raízes, os tecidos biológicos etc., apresentam cargas elétricas em sua superfície, tanto positivas quanto negativas, permanentes ou não. As cargas permanentes são aquelas que aparecem principalmente nos cristais de argila, como consequência da substituição isomórfica. As cargas não permanentes aparecem sempre que uma superfície apresenta as propriedades de ácido ou base fracos. Os materiais que compõem a fração sólida do solo, em contacto com a solução do solo, apresentam essas propriedades, gerando as cargas não permanentes. Quando uma superfície apresenta cargas negativas em excesso, ela é denominada "**trocadora de cátions**" e quando possui excesso de cargas positivas, "**trocadora de ânions**". É possível medir quantitativamente tanto a capacidade de troca catiônica "**CTC**", quanto a capacidade de troca aniônica "**CTA**" de um solo. Esses valores são expressos em miliequivalentes de íons adsorvidos por 100 gramas de solo. Os valores de CTA ou CTC dependem das cargas não permanentes, e estas, por sua vez, dependem do pH. Existe um valor de pH, no qual o número de cargas positivas se iguala ao número de cargas negativas, tornando a carga líquida nula e caracterizando o ponto isoelétrico do sistema.

Ainda segundo **REICHARDT (1985)**, em condições normais, os solos geralmente apresentam-se como trocadores de cátions, em virtude do excesso de cargas negativas de suas partículas, o que é confirmado por outros AA., entre eles **VARGAS (1977)**,

que diz: "os grãos de argila, pelo menos quando dispersos em água, têm uma carga negativa, como se pode constatar pela migração das partículas da suspensão na direção do pólo positivo, quando se faz passar uma corrente elétrica pela suspensão".

Para a agronomia, a determinação da CTC torna-se importante nos estudos de fertilidade do solo e disponibilidade de nutrientes para as plantas. No que se refere a tratamento e/ou disposição de resíduos no solo, a CTC está relacionada com a maior ou menor disponibilidade de nutrientes, para o crescimento biológico dos microrganismos responsáveis pelos processos de degradação da matéria orgânica presente nesses resíduos. Está também relacionada com a retenção de íons metálicos na matriz do solo.

Segundo **REICHARDT (1985)** e outros AA., entre eles **WUTKE e CAMARGO (1975)**, a troca de cátions, entre as fases sólida e líquida do solo, é um processo reversível. Os cátions "fixos" na superfície das partículas carregadas do solo ou no interior dos cristais de algumas espécies minerais, além de cátions ligados a certos compostos orgânicos, podem ser reversivelmente substituídos por aqueles cátions presentes na solução do solo.

REICHARDT (1985), reportando-se à nutrição das plantas, afirma: a fração sólida do solo, tanto mineral quanto orgânica, é o reservatório de nutrientes. Para que a planta se desenvolva satisfatoriamente, é necessário que a atividade de cada nutriente seja adequada na solução do solo. Essa atividade depende, principalmente, da absorção dos íons que se encontram na solução do solo, pelas raízes das plantas (pode-se dizer também por colônias de microrganismos, em fase de crescimento biológico). Depende também da "liberação" de novos íons "disponíveis" da fase sólida. Segundo o A., o NO_3^- e o Cl^- são praticamente livres de adsorção na maioria dos solos; o K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ são adsorvidos eletricamente; o Fe^{3+} e o Cu^{2+} podem formar complexos e quelatos naturais; o fósforo pode formar complexos de alta insolubilidade com os óxidos de Al e Fe etc. De todas essas formas de adsorção depende a taxa de liberação de cada nutriente para a fase líquida.

Para **WUTKE e CAMARGO (1975)**, a adsorção de íons é uma propriedade característica de substâncias com elevada superfície específica, principalmente quando se enquadram nos limites do estado coloidal da matéria. A troca iônica é devida, quase que totalmente, aos minerais de argila (partículas menores que 2 micras), ao silte (partículas entre 2

e 20 micras) e à matéria orgânica decomposta, na forma coloidal. Ainda segundo esses AA., os íons envolvidos na troca iônica ligam-se à fase sólida eletrostaticamente ou por covalência e, em ambos os casos, esse tipo de união é denominado **ADSORÇÃO IÔNICA**.

Segundo a **CETESB (1991)**, vários são os fatores que afetam a adsorção dos íons no solo, sendo a força de atração uma função da valência, do raio iônico e do grau de hidratação iônica dos íons adsorvidos. Ainda a **CETESB (1991)**, confirmando o que disseram **WUTKE e CAMARGO (1975)** e **REICHARDT (1985)**, entende que, ao lado da adsorção eletrostática, íons podem também se ligar às partículas através de ligações covalentes. Neste caso, a adsorção é chamada de específica e, sendo mais forte a energia de ligação, os íons adsorvidos são menos sujeitos à troca.

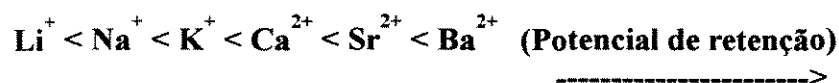
No entanto, dos estudos de coagulação e floculação (**DI BERNARDO, s.d.**), pode-se deduzir que a propriedade de adsorção entre partículas de pequeníssimas dimensões poderia estar também relacionada com as "Forças de Van Der Waals", uma vez que, quanto menor a distância entre elas, maior é a energia de atração, mesmo para partículas de mesma carga, preponderando sobre as forças repulsivas.

ROCCA et al. (1993) confirmam as afirmações acima dizendo: "a superfície da argila, carregada negativamente, mais a camada adjacente de cátions adsorvidos, são chamadas de dupla camada. Se o cátion predominante na dupla camada for Na^+ , as partículas individuais de argila não estarão muito próximas, porque os íons de Na^+ são cercados por moléculas de água (ou são hidratados), produzindo uma espessa dupla camada... Para argilas sódicas, as forças eletrostáticas repulsivas entre as partículas carregadas negativamente são superiores às atrações de Van Der Waals, obrigando as partículas a tomarem uma conformação dispersa. Essa dispersão ocorre realmente se 10 a 20% dos cátions adsorvidos forem Na^+ . Solos com argila predominantemente sódica têm estrutura pobre, com tendência a se escoarem, possuem baixa permeabilidade, são amorfos e se tornam duros quando secos. No entanto, se os cátions na dupla camada, em volta das partículas de argila, forem principalmente Ca^{2+} e Mg^{2+} , as partículas estarão muito próximas. Isso ocorre porque Ca^{2+} e Mg^{2+} não são hidratados e por isso têm um menor tamanho ... Como as forças de Van Der Waals aumentam rapidamente com o decréscimo da distância entre as partículas, as forças atrativas são

dominantes e as partículas de argila assumem uma conformação floculada. Um solo com predominância de íons Ca^{2+} e íons Mg^{2+} , comporta-se como um solo coesivo e tem uma boa estrutura. Tais solos são mais permeáveis e friáveis que os solos com argila dispersa".

WUTKE e CAMARGO (1975), afirmam que, nos solos, os mais importantes cátions são: Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; H^+ ; K^+ ; Na^+ e NH_4^+ , sendo que o cálcio é o íon de maior abundância relativa. Entre os ânions, os mais importantes seriam: o SO_4^{2-} ; Cl^- ; NO_3^- ; H_2PO_4^- ; HPO_4^{2-} ; HCO_3^- e os ânions de ácidos húmicos.

VARGAS (1977), confirmando as afirmações acima diz que "a capacidade de troca iônica é inversamente proporcional ao tamanho do grão" e completa dizendo que o íon Na^+ é mais fácil de ser trocável, enquanto que o Ca^{2+} é mais difícil. Assim os íons de sódio são trocados pelos de potássio, estes pelos de magnésio e estes últimos pelos de cálcio". Segundo **ROCCA et al. (1993)**, a facilidade relativa da troca seria variável e poderia ser representada pela série abaixo, onde o íon Ba^{2+} é mais fácil de ser retido (ou em outras palavras teria menor disponibilidade de troca), do que o Sr^{2+} e assim por diante.



Os AA. afirmam ainda "os íons presentes na solução comportam-se de acordo com a sua carga elétrica, ou seja, a maioria dos ânions (cloretos, nitratos, sulfetos, silicatos) deslocam-se e se dispersam na água geralmente com pouco ou nenhum retardamento, enquanto que todos os cátions, em maior ou menor grau, estão sujeitos à troca de íons e a adsorção em argila e silte".

Segundo **JORGE (1975)**, devido ao seu alto grau de fracionamento, a matéria orgânica apresenta alta superfície específica. Sua CTC é da ordem de 150 a 300 meq/100g, sendo bastante superior à das argilas. A caulinita, por exemplo, tem CTC da ordem de 5 a 15 meq/100g e a montmorilonita 100 meq/100g. A CTC das argilas e também da matéria orgânica é bastante influenciada pelo pH, crescendo a CTC com o aumento do pH (Tab. 2.9).

Tab. 2.9 - INFLUÊNCIA DO PH NA CTC DOS SOLOS

pH	CTC (meq/100g)	
	Matéria Orgânica	Fração Argila
2,5	36	38
3,5	73	46
5,0	127	54
6,0	131	56
7,0	163	60
8,0	313	64

Fonte: RUELLAN e DELÉTANG (1967) - apud JORGE (1975)

Conclui-se que a matéria orgânica presente no lodo de esgoto, ao ser degradada, aumenta a percentagem de húmus no solo. Com isso aumenta também a CTC desse solo e a sua capacidade de reter íons metálicos que, de outra forma, poderiam ser carreados através do movimento da água pluvial que percola, contaminando os lençóis subterrâneos. Essa maior capacidade de retenção, no que se refere à aplicação de lodos contendo metais, em solos agrícolas, resulta numa acumulação de metais que deve ser controlada, para evitar a possibilidade de passagem para a cadeia alimentar, através das plantas.

2.3.3 - Microrganismos do solo

O sucesso da degradação de resíduos orgânicos, lançados num determinado solo, deve-se à presença de microrganismos, principalmente as bactérias. Entre valores de pH do solo de 5,5 a 8,5 desenvolvem-se melhor as bactérias, enquanto que nos solos com valor de pH abaixo de 5,5 desenvolvem-se os fungos, cuja capacidade de degradação da matéria orgânica é menor (FULLER e WARRICK, 1985). Na Tab. 2.10, reproduz-se, de acordo com ALEXANDER (1961), uma faixa de valores estimados para o número de microrganismos encontrados em um grama de solo.

Tab. 2.10 - QUANTIDADE DE MICRORGANISMOS NOS SOLOS

TIPOS DE MICRORGANISMOS	FAIXA DE VALORES ESTIMADOS (por grama de solo)
BACTÉRIAS	3.000.000 a 500.000.000
ACTINOMICETOS	1.000.000 a 20.000.000
FUNGOS	5.000 a 900.000
ALGAS	1.000 a 500.000
PROTOZOÁRIOS	1.000 a 500.000
LEVEDURAS	1.000 a 100.000
NEMATÓIDES	50 a 200

Fonte: ALEXANDER (1961)

Segundo **ALEXANDER (1961)**, os principais microrganismos do solo fértil são: bactérias, actinomicetos, fungos, leveduras, algas, protozoários e nematóides. O peso desses microrganismos vivos é estimado na faixa de 0,5 a 4 toneladas/ha, considerando o volume de solo numa profundidade de até 15 cm.

2.3.4 - Aplicação de lodo no solo (na forma líquida)

Segundo **PIKE e DAVIS (1984)** a aplicação de lodo na forma líquida é mais vantajosa, quando comparada com o lodo desidratado, do ponto de vista de disponibilidade de água e nutrientes para solos agrícolas. Nos processos de desidratação há uma perda dos nutrientes solúveis.

No entanto, para a escolha das taxas de lançamento do lodo no solo, na forma líquida, deve-se levar em conta a presença de nitratos em excesso, para evitar a contaminação das águas subterrâneas, por lixiviação. No Reino Unido, a **ANGLIAN WATER (1991)** limita a aplicação de nitrogênio total em 250 kg/ha por ano, nas áreas susceptíveis de contaminação do lençol freático por nitratos. **BROWN (1975)** afirma que a poluição por nitratos pode ser evitada fazendo-se um balanço entre a quantidade de nitrogênio aplicado ao solo, prontamente disponível para as plantas e a soma do nitrogênio necessário à cultura em questão, mais as perdas por desnitrificação e volatilização. Ainda segundo esse A., o nitrogênio presente no

lodo estaria sob duas formas: amoniacal (prontamente disponível para as plantas) e orgânica (que ainda vai ser decomposto, passando para a forma amoniacal), através da ação dos microrganismos.

Nos processos aeróbios de degradação de lodos, através da aeração prolongada, ocorre a nitrificação (oxidação da amônia para nitrato), ocorrendo nitratos na fase líquida do lodo. O nitrato é também prontamente disponível para as plantas. Segundo **CORAUCCI (1991)**, a volatilização ocorreria com o nitrogênio amoniacal (sob $\text{pH} > 7$), e a desnitrificação (passagem do nitrato para a forma gasosa N_2 , com escape para a atmosfera), em condições anaeróbias.

MATTHEWS (1992) afirma que, na Inglaterra, a taxa de aplicação de lodo líquido digerido no solo estaria por volta de 1 a 5 tds/ha (toneladas de sólidos secos por hectare ou em média $150 \text{ m}^3/\text{ha}$), limitadas pelos teores de fósforo e de nitratos. Essas taxas podem ser bem maiores para lodos desidratados, dependendo do tipo de cultura, uma vez que diminuem os riscos de contaminação das águas subterrâneas por fósforo e nitratos, mas, por outro lado, o fator limitante passa a ser o teor de metais pesados presentes no solo e no lodo. **SANTOS (1979)** afirma que a aplicação do lodo, a taxas que atendam às necessidades de nitrogênio da cultura, estaria usualmente na faixa de 11 a 22 toneladas de lodo líquido digerido por hectare e por ano, o que conflita um pouco com as afirmações de **MATTHEWS (1992)**.

Um outro aspecto está relacionado com a capacidade de infiltração de água no solo. Segundo **CORAUCCI (1991)**, solos com excesso de água apresentam reduzida capacidade de troca de O_2 com a atmosfera. A deficiência de O_2 reduz a velocidade de degradação da matéria orgânica, presente nesse solo, podendo-se instalar os ambientes anaeróbios, cujos solos apresentam-se com grandes quantidades de matéria orgânica sem decomposição (turfas).

No lançamento do lodo líquido ao solo, há ainda o aspecto relacionado com o maior custo de transporte, quando comparado com a torta. Um outro aspecto seria a necessidade de estocagem do lodo em grandes volumes, até o momento da utilização, pois em culturas anuais, o lodo é aplicado apenas no período anterior ao plantio. Em alguns locais isso é resolvido com a utilização de lagoas de lodo (**HUNT et al., 1994**). O problema de

estocagem foi anteriormente salientado, no artigo de **STEINLE (1993)** sobre as pequenas comunidades alemãs.

Naturalmente há necessidade de se fazer um estudo econômico quando as distâncias do ponto de produção ao ponto de lançamento são grandes. Em alguns casos, pode não ser economicamente viável o lançamento de lodo líquido, a não ser onde haja outras facilidades, em termos de transporte.

Existem equipamentos especialmente projetados para aplicação do lodo líquido ao solo (**USEPA, 1983**). Recomenda-se a aeração do solo, após o lançamento do lodo, através de operações de gradeamento, que possibilita uma melhor “performance” no processo de degradação aeróbia da matéria orgânica remanescente. Recomenda-se ainda que a aplicação do lodo seja feita após a aração e antes do gradeamento (antes do plantio).

2.3.5 - Aplicação de lodo desidratado no solo

A aplicação da torta (lodo desidratado) apresenta como principal limitação os teores de metais tóxicos presentes na torta. Não se pode, portanto, generalizar em termos de taxa de lançamento da torta, pois depende das quantidades pré-existentes no solo e das quantidades a serem lançadas com o lodo. A aplicação direta de lodo desidratado no solo está sujeita às mesmas limitações do lodo líquido, com relação aos patogênicos. Apresenta, no entanto, a vantagem de um menor volume de transporte.

Para a desidratação do lodo, através de filtros-prensa de placas, utiliza-se cerca de 10 a 20% de cal para o condicionamento químico (**ALMEIDA e MUJERIEGO, 1977**). Segundo **BALMER e KAFFEHR (1983)**, esse tipo de lodo apresentaria certas vantagens quando aplicado ao solo, em virtude da presença da cal. Esta é utilizada no condicionamento do lodo, e teria a vantagem de agir como um tampão em relação a um possível abaixamento do pH (podendo tornar desnecessária a calagem dos solos originariamente ácidos).

2.3.6 - Utilização do lodo após compostagem

De acordo com **VIESSMAN e HAMMER (1985)**, os objetivos da compostagem são: estabilizar a matéria orgânica putrescível do lodo (mesmo o lodo digerido ainda possui uma certa quantidade), destruir organismos patogênicos e reduzir o volume.

A compostagem pode ser feita através do empilhamento do lodo em montes ou em leiras. É necessário promover a aeração, que pode ser feita com revolvimento manual periódico ou com aeração forçada. Os processos de compostagem podem ser simples ou sofisticados, no entanto, os objetivos a serem alcançados são sempre os mesmos. O que alguns processos mais sofisticados buscam é diminuir o tempo necessário para alcançar tais objetivos.

A compostagem possibilita a biodegradação da matéria orgânica remanescente no lodo, através de microrganismos termofílicos aeróbios. O processo promove um aumento da temperatura no interior do monte ou pilha, permitindo o crescimento desses tipos de microrganismos, que apresentam uma velocidade de biodegradação mais alta.

VIESSMAN e HAMMER (1985) fazem as seguintes recomendações, com relação à compostagem:

- a umidade ótima para a compostagem em pilhas seria de 50 a 60% - com menos de 40% ocorreria limitação da taxa de biodegradação, e com mais de 60% seria difícil conseguir o empilhamento;
- a redução de sólidos voláteis durante a compostagem é em média de 50%;
- para permitir maior eficiência na estabilização e na eliminação de organismos patogênicos, a temperatura na pilha de compostagem deve subir até uma faixa de 55 a 65°C, mas nunca deve ultrapassar 80°C, para que não ocorra a morte dos microrganismos responsáveis pelo processo;
- o processo é aeróbio, havendo necessidade de mistura com outros resíduos, tais como casca de arroz, pó de serra, cavacos de madeira ou esterco de curral, visando a aumentar a porosidade e permitir a aeração da pilha;

- no empilhamento em leiras, a altura é, usualmente, de 1,20m a 2,40m., e a largura, de 2,40m a 3,60m;
- sob condições de bom tempo, a estabilização requer de 4 a 6 semanas, com um revolvimento semanal para manter a aeração, e em locais chuvosos, pode-se pensar em ambientes cobertos;
- o composto obtido é um húmus friável e úmido (com teor de umidade por volta de 40 %); esse composto é um ótimo condicionador do solo.

Alguns AA. apresentam processos sofisticados de compostagem em pilhas estáticas, com aeração forçada e controle de temperatura, visando a aumentar o rendimento e diminuir o tempo do processo (STENTIFORD, MARA e TAYLOR, 1984; BERTOLDI, VALLINI e PERA, 1984). Com o mesmo objetivo, algumas empresas apresentam equipamentos patenteados (por exemplo o sistema KNEER). O método da compostagem apresenta a vantagem de se poder estocar o composto, podendo este ser comercializado a granel ou ensacado, para posterior aplicação no solo.

2.3.7 - Utilização do lodo como adubo organo-mineral

Em algumas cidades são utilizados processos industriais, sendo a elevação da temperatura um primeiro passo na transformação do lodo em adubo organo-mineral.

NOGUCHI e ITO (1992) apresentam um processo industrial, na qual a desidratação do lodo é feita a 900°C, e obtém-se, em 40 minutos, um composto granular com 90% de teor de sólidos, com a utilização de aproximadamente 20% de carbonato de cálcio (CaCO_3), para neutralização da acidez do lodo. A Tab. 2.11 mostra a composição química desse composto fertilizante, obtido a partir de um lodo de esgoto municipal, da cidade de Yokohama-Japão. Concluem esses AA., em seu trabalho, que:

- o fertilizante fabricado a partir de lodo de esgotos municipais contém a mesma proporção de nutrientes dos outros fertilizantes orgânicos;
- esse tipo de fertilizante apresentou taxas de transferência mínimas de metais do lodo para as plantas;

- esse fertilizante pode ser utilizado imediatamente após a fabricação, uma vez que a alta temperatura destrói completamente os patogênicos;
- pode ser reaplicado várias vezes no mesmo local, por grandes períodos de tempo, sem nenhum problema.

Tab. 2.11 - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO FERTILIZANTE ORGANO-MINERAL DE LODO (valores de concentração em mg do elemento por kg de fertilizante seco).

DISCRIMINAÇÃO	UNID.	VALORES CARACTERÍSTICOS
teor de umidade	(%)	4,0
perda de umidade por temperatura	(%)	65,0
nitrogênio total	(mg/kg)	22.000,0
PO ₄	(mg/kg)	28.000,0
K ₂ O	(mg/kg)	2.890,0
MgO	(mg/kg)	11.000,0
CaO	(mg/kg)	120.000,0
Fe	(mg/kg)	17.900,0
Mn	(mg/kg)	389,0
Cu	(mg/kg)	233,0
Zn	(mg/kg)	1.170,0
Pb	(mg/kg)	61,1
Ni	(mg/kg)	30,1
Cr	(mg/kg)	55,4
Cd	(mg/kg)	2,4
Hg	(mg/kg)	1,4

Fonte: adaptado de NOGUCHI e ITO (1992)

Os adubos organo-minerais, fabricados a partir do lodo de esgoto, a exemplo do processo apresentado por **NOGUCHI e ITO (1992)**, por serem submetidos a altas temperaturas, eliminam definitivamente o problema dos patogênicos. Podem ainda sofrer correção do teor de nutrientes, e os volumes de transporte são bastante diminuídos. No entanto, por se tratar um produto bastante concentrado, há necessidade de monitoramento da quantidade de metais tóxicos, no produto final obtido.

3. METODOLOGIA

3.1. Considerações Preliminares

Os lodos, principalmente aqueles provenientes de processos onde a degradação é aeróbia, apresentam ainda uma certa quantidade de matéria orgânica a ser estabilizada. Os solos, através da ação dos seus microrganismos, têm a capacidade de degradar essa matéria orgânica. As velocidades de degradação dependem das características físicas, químicas e biológicas de cada solo. Dependem também da quantidade e características do lodo utilizado.

As velocidades de degradação da matéria orgânica no solo podem ser acompanhadas, ao longo do tempo, através do ensaio de respirometria. Por ser um método relativamente simples e de baixo custo, foi escolhido como principal instrumento de análise nesta pesquisa. A metodologia proposta foi baseada no Projeto de Norma 01:603.06-007 da ABNT (1993).

3.2 - O trabalho experimental

O trabalho experimental foi dividido em 2 fases. A 1ª fase, denominada "Aferição de Procedimentos", permitiu testar a metodologia escolhida, para esse tipo de resíduo. A 2ª fase teve por finalidade a coleta definitiva de dados.

Em razão da utilização do lodo em estado líquido, houve necessidade de algumas adaptações em relação aos procedimentos apresentados no projeto de norma ABNT (1993) e que foram convenientemente relatadas nos itens correspondentes.

A **Tab. 3.1** apresenta um resumo dos trabalhos e ensaios realizados, especificando o item onde estes foram detalhados.

Tab. 3.1 - RESUMO DO TRABALHO EXPERIMENTAL

a) Caracterização preliminar do solo:	ver item
preparo do solo para caracterização	3.4.1
massa específica aparente	3.4.2
capacidade de campo	3.4.3
pH	3.4.4
teor de umidade	3.4.5
teor de sólidos voláteis	3.4.5
teor de carbono	3.4.6
teor de matéria orgânica	3.4.6
curva granulométrica	3.4.7
textura	3.4.7
macro-nutrientes (N, P, K, Ca, Mg).....	3.4.8
b) Caracterização preliminar do lodo:	
teor de umidade	3.5.1
teor de sólidos totais	3.5.1
teor de sólidos totais fixos	3.5.1
teor de sólidos totais voláteis	3.5.1
concentração de sólidos	3.5.1
massa específica	3.5.1
pH	3.5.2
teor de carbono e de mat. orgânica.....	3.5.3
teor de metais	3.5.4
c) Acompanhamento da biodegradação ao longo do tempo	
aferição de procedimentos	3.2
cuba para lançamento do lodo	3.3.3
pH	3.4.4
teor de umidade	3.4.5
teor de sólidos voláteis	3.4.5
teor de carbono	3.4.6
teor de matéria orgânica	3.4.6
lançamento de lodo no solo	3.6
geração de CO ₂ (respirometria)	3.7

Antes do início de cada fase, foi feita a caracterização do solo e o posterior monitoramento ao longo do tempo. A caracterização do lodo foi sempre realizada antes de cada aplicação no solo. Os ensaios realizados foram listados na **Tab. 3.1**. Na 1ª fase não foi possível a determinação dos teores de nutrientes do solo, nem de metais no lodo.

A 1ª fase teve 2 aplicações de lodo no solo. Na 1ª delas utilizou-se a taxa de 16,5 tds/ha (toneladas de sólidos secos por hectare). Após 28 dias, foi feita a 2ª aplicação no

mesmo solo, com taxa de 13,5 tds/ha, totalizando 30,0 tds/ha. Nessa fase utilizaram-se 2 recipientes (latas) de 18 litros, com área superficial de aproximadamente $0,058 \text{ m}^2$. Os recipientes tiveram o fundo perfurado para permitir a drenagem do excesso de líquido, que ocorreu tanto nas aplicações de lodo quanto por ocasião de chuvas. Nos dois recipientes foi colocado o mesmo tipo de solo, com espessura de 0,15 m. Para evitar carreamento de solo (lixiviação), o fundo do recipiente foi previamente preenchido com uma camada filtrante e drenante, composta de brita nº 01, seguida por areia, ambas com espessura de 0,10m. O solo foi colocado sobre a camada de areia. Essa areia apresentou, no ensaio de granulometria previamente realizado: 45,5 % de partículas na faixa de 0,1 a 1,0 mm e cerca de 35,5 % entre 1 e 10 mm, tendo sido caracterizada, como areia média a grossa. Num dos recipientes, denominado cuba 0, não foi feito nenhum lançamento de lodo (solo-controle). O recipiente que recebeu dois lançamentos de lodo foi denominado cuba 15.

Nessa 1ª fase, o monitoramento do solo nas cubas 0 e 15 prolongou-se por um período de aproximadamente 6 meses, tendo sido realizados os ensaios relacionados na Tab. 3.1. Após 24 horas da 1ª aplicação de lodo na cuba 15, foram coletadas amostras do solo-controle e da mistura solo-lodo, com as quais foram montados 4 respirômetros (2 com o solo-controle e 2 com a mistura solo-lodo), sendo 1 do tipo padrão e 1 alternativo em cada tratamento (**Fig. 3.3 e 3.4**). Após 28 dias da primeira aplicação (6 horas após a reaplicação de lodo), foi coletada uma nova amostra na cuba 15, com a qual foram montados mais 2 respirômetros (1 padrão e 1 alternativo).

Na 2ª fase, o monitoramento do solo também teve duração de aproximadamente 6 meses, durante os quais foram obtidos os dados definitivos da pesquisa, através dos ensaios relacionados na **Tab. 3.1**. Utilizou-se o mesmo tipo de solo da 1ª fase e o lodo foi sempre coletado na mesma estação de tratamento de esgotos, descrita no item 3.3.1. Nessa fase foram montados 4 protótipos (ver desenho esquemático na Fig. 3.2), denominados cubas: 0, 5, 10 e 15. Além do solo-controle (cuba 0), que não recebeu lodo, monitoraram-se os solos que receberam três diferentes taxas de aplicação de lodo: 5, 10 e 15 tds/ha (respectivamente cubas 5, 10 e 15). Nessa fase, os respirômetros foram montados em triplicata (1 padrão e 2 do tipo alternativo, em cada tratamento). Na cuba 5 foram feitas "5" aplicações,

sempre com a mesma taxa de 5 tds/ha, obedecendo à seguinte sequência de datas de aplicação: 0 (data da 1ª aplicação), 21 (1ª reaplicação), 56 (2ª reaplicação), 84 (3ª reaplicação) e 112 dias (4ª e última reaplicação). Com as medidas do CO₂ gerado, através dos ensaios de respirometria, puderam ser obtidos os seguintes dados:

- tempo despendido na degradação do lodo no solo, para cada tratamento, incluindo as reaplicações;
- dentre as taxas propostas, aquela que apresentou melhor desempenho, em termos de velocidade de degradação.

Os demais parâmetros (valores de pH, teor de umidade, teor de sólidos voláteis, teor de carbono e de matéria orgânica) foram determinados nas amostras coletadas diretamente das cubas, ao longo do tempo. Esses mesmos parâmetros foram determinados nas amostras incubadas nos respirômetros (obtidos nas amostras antes e ao final do período de incubação), com a finalidade de se conhecer o comportamento dos mesmos.

3.3 - Materiais, equipamentos e outros

3.3.1 - Lodo líquido

O lodo foi sempre lançado, no solo das cubas, em estado líquido e sempre coletado na estação de tratamento de esgotos **ETE - Riacho Grande**, que trata os esgotos do bairro de mesmo nome (ver localização na **Fig. 3.1**). Esse bairro está situado às margens da represa Billings, no km 29 da Via Anchieta, município de São Bernardo do Campo “SBC”, Estado de São Paulo. Trata-se de um bairro residencial isolado e sem indústrias. O esgoto afluente a essa ETE, com vazão média em torno de 4 l/s, é de origem essencialmente doméstica. O tipo de tratamento é uma variante do processo de lodos ativados, denominado valo de oxidação, na qual a degradação do lodo é aeróbia e ocorre no próprio valo, como consequência da aeração prolongada. Essa ETE é dotada de grade (1 unidade), caixas de areia (2 unidades), valos de oxidação (2 unidades), decantadores (2 unidades) e 1 poço de armazenamento de lodo, dotado de um sistema de bombeamento, direcionado para recirculação e/ou descarte. O lodo

descartado é desidratado em leitos de secagem (5 unidades, com área total aproximada de 400 m²). Existem problemas com a secagem desse lodo, pois o clima da região se caracteriza por apresentar um elevado número de dias chuvosos: média anual de 167 dias e máximo de 230 dias, verificados num período de 17 anos, para o posto pluviométrico E3-142 da rede do DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. Para esse mesmo posto, no mesmo período de tempo, a média dos totais anuais foi de 1395,8 mm, com máxima de 1988,9 mm. Esse posto pluviométrico situa-se na latitude 23° 45', longitude 46° 32', altitude de 840m e encontra-se próximo ao local da ETE (ver localização na Fig. 3.1).

3.3.2 - Solo

Foi utilizada uma mistura de solos, preparada para aplicação em parques e jardins, na Prefeitura Municipal de São Bernardo do Campo - SP. No local de coleta, esse solo encontrava-se desestruturado, homogeneizado e amontoado. Foram coletados cerca de 250 litros de solo, para possibilitar a montagem das cubas (1ª e 2ª fases).

3.3.3 - Cuba para lançamento do lodo no solo

Na montagem das cubas usadas na 2ª fase (ver desenho esquemático na Fig. 3.2) foram utilizados os seguintes materiais:

- cuba de plástico de aprox. 200 litros 4 unid.;
- areia média a grossa 130 litros;
- pedra britada nº 01 200 litros;
- solo (TFSA - terra fina seca ao ar) 160 litros;
- argamassa de cimento e areia (traço 1:3) 100 litros;
- bidim (OP-30 da Rhodia)..... 4 m²;
- adaptador c/rosca e flange p/cx. d'água (diam. = 3/4")..... 4 unid.;
- registro de PVC (diam. = 3/4") 4 unid.

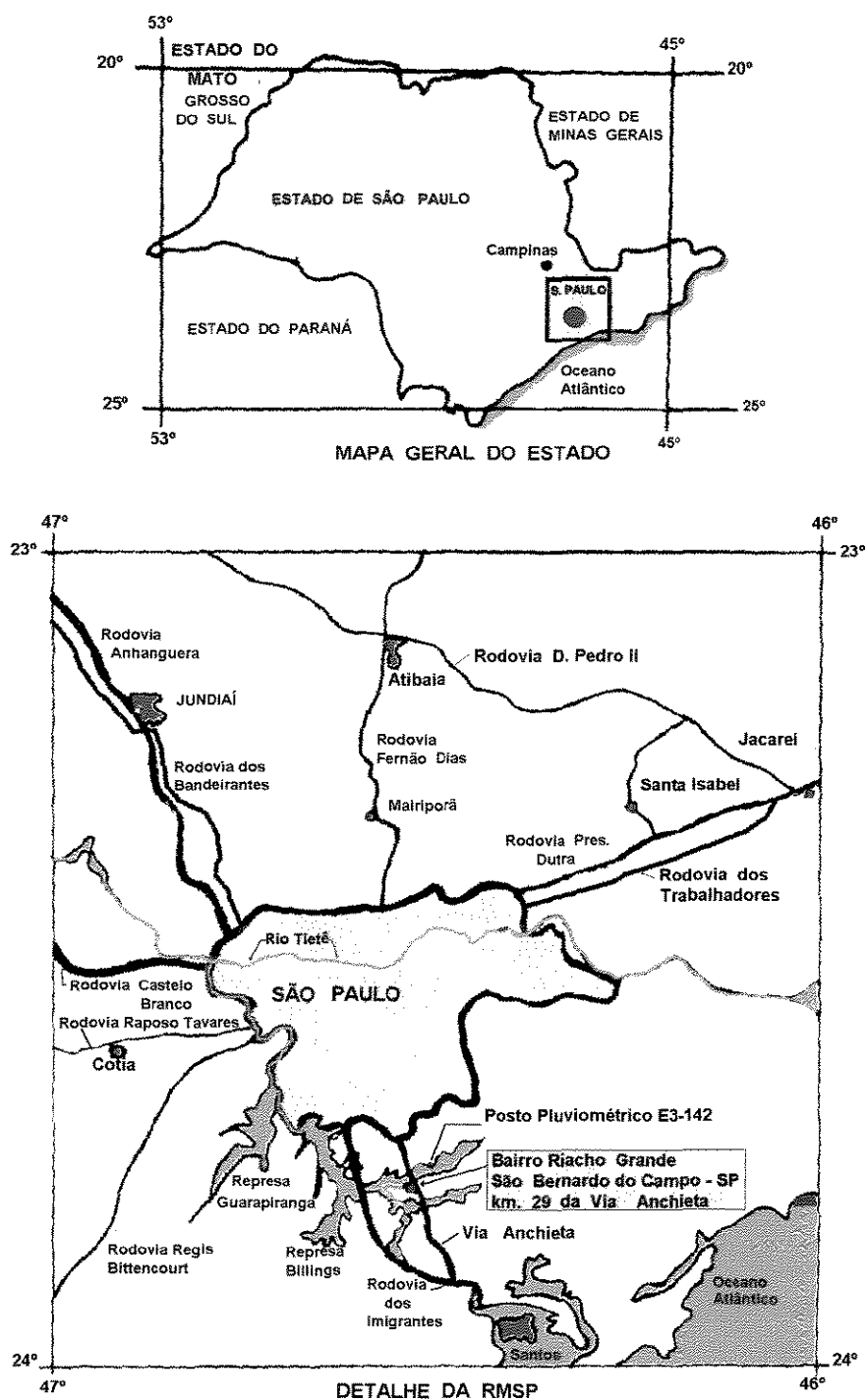
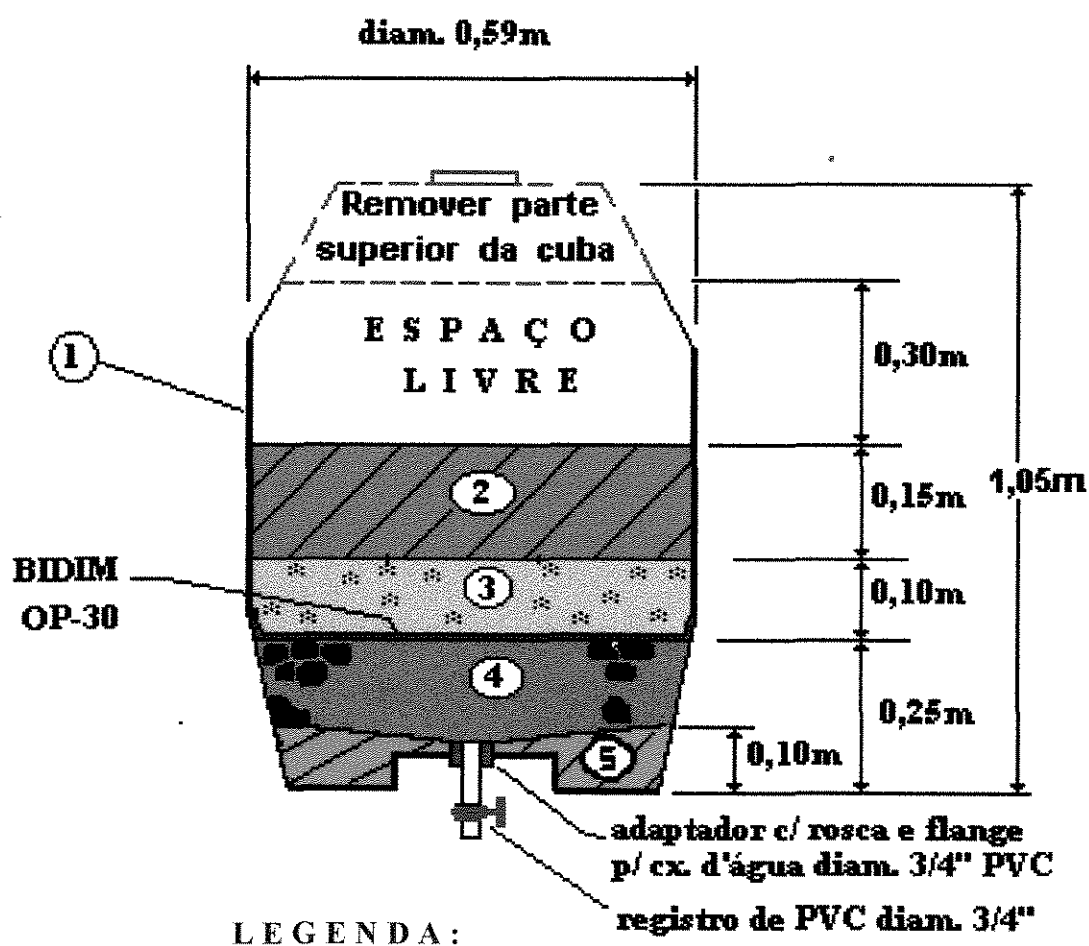


Fig. 3.1 - LOCALIZAÇÃO DA ETE RIACHO GRANDE - SBC - SP
MAPA GERAL E DETALHE DA RMSP



- 1 - Cuba de plástico diam. = 0,60m, alt. = 1,05m e capac. 200 l.
- 2 - Solo lançado "TFSA" (ver ítem 3.4.1.2)
- 3 - areia média a grossa (para transição)
- 4 - pedra britada nº 1 (suporte drenante)
- 5 - argamassa de cimento e areia, traço 1:3 (p/regularização)

Fig. 3.2 - ESQUEMA DA CUBA PARA LANÇAMENTO DO LODO NO SOLO

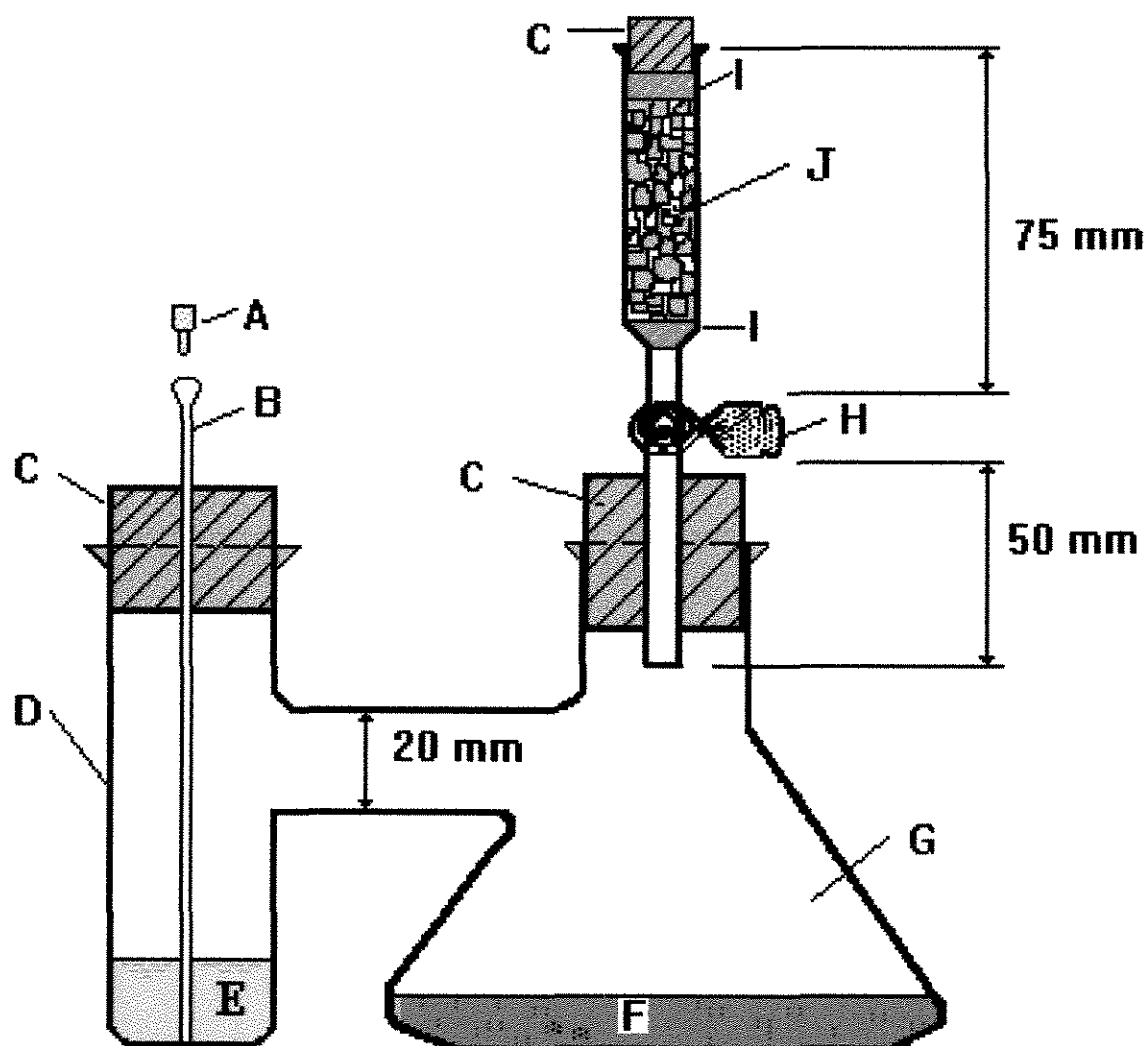
3.3.4 - Respirômetros

Serão utilizados dois tipos de respirômetros: o de Bartha, considerado como padrão (CETESB, 1990), e um respirômetro alternativo. Os desenhos esquemáticos desses respirômetros são apresentados respectivamente nas Fig. 3.3 e 3.4. O respirômetro alternativo é uma adaptação feita pelo autor, visando à diminuição de custos. As seguintes quantidades foram utilizadas:

- **1ª fase - aferição de procedimentos:** na 1ª aplicação de lodo foram montados 4 respirômetros (2 padrões e 2 alternativos), e na 2ª aplicação foram montados mais 1 padrão e 1 alternativo;
- **2ª fase - coleta definitiva de dados:** na 1ª aplicação de lodo nas cubas 5, 10 e 15 montaram-se 12 respirômetros (4 padrões e 8 alternativos) e em cada uma das 4 reaplicações de lodo na cuba 5 foram montados mais 2 respirômetros padrão e 4 alternativos, num total de 36 respirômetros.

3.3.5 - Equipamentos, aparelhos e outros

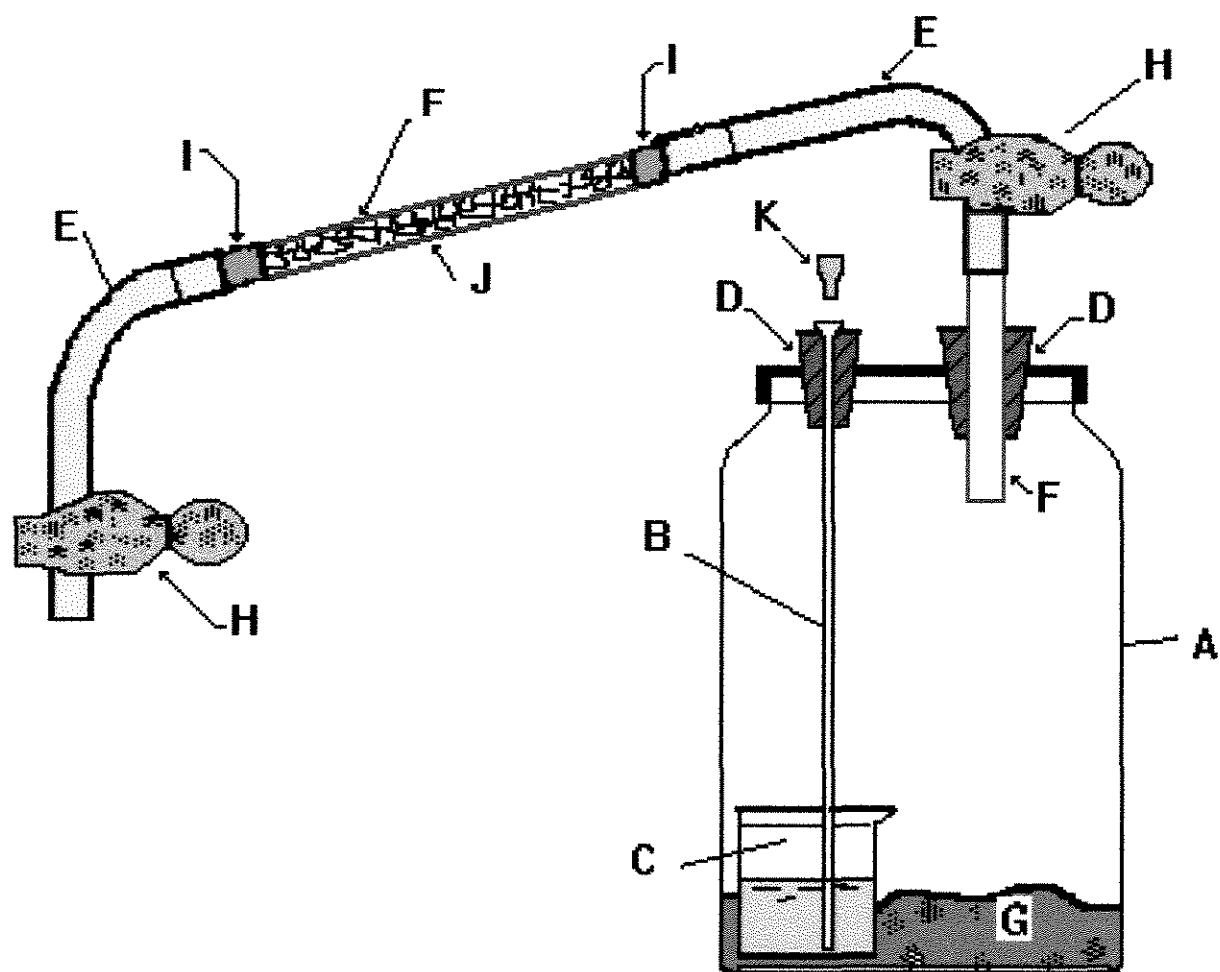
Foram utilizados: balanças (1 com capacidade de 160g e precisão de 0,1 mg e outra com capacidade de 1.200g e precisão 0,01 g); aparelho p/aquecimento em banho maria; estufa (para aquecimento a 105°C); mufla (para aquecimento a 550°C); incubadora de DBO, mantida a $(28 \pm 2)^\circ\text{C}$ para os respirômetros; bico de bunsen; bomba de ar (tipo aquário); pHmetro; suporte para bureta; agitador magnético (com 2 bastões); conjunto de peneiras, densímetro e picnômetro (p/ determinação da granulometria do solo); termômetros (0 a 100°C e 0 a 500°C); dessecador; conjunto para destilação e deionização de água.



LEGENDA:

- A - Tampa da cânula (vedação com papel "PARA-FILM")
- B - Cânula ($\varnothing$ int. 1 a 2 mm) com dispositivo para a introdução da seringa
- C - Vedação com rolha de borracha
- D - Braço lateral ($\varnothing = 40$ mm; H = 100 mm)
- E - Solução de KOH - 0,4 N
- F - Amostra de solo ou da mistura solo-lodo (50 gramas em bases secas)
- G - Frasco Erlenmeyer (250 ml)
- H - Válvula
- I - Camada suporte (lã de vidro ou algodão)
- J - Filtro de ascarita ou cal sodada ($\phi = 15$ mm e H = 40 mm)

Fig. 3.3 - ESQUEMA DO RESPIRÔMETRO PADRÃO (BARTHA)
 Fonte: CETESB (1990)



LEGENDA:

- A - Frasco de vidro (560 ml) com tampa metálica;
- B - Cânula (ϕ int. 1 a 2 mm) com dispositivo para a introdução da seringa (adaptado com agulha de injeção);
- C - bequer de 20 ml para colocação da solução de KOH - 0,4 N;
- D - Vedação com rolha de borracha;
- E - mangueira de borracha (diâmetro de 6 mm);
- F - tubo de vidro (diâmetro de 6 mm);
- G - Amostras de solo ou da mistura solo-lodo (50 gramas em bases secas);
- H - Presilhas de Mohr (para seccionamento do fluxo de ar);
- I - Camada suporte (lã de vidro ou algodão);
- J - Filtro de ascarita ou de cal sodada (tubo de vidro diam. 6 mm, compr. 0,25m);
- k - Tampa da cânula (vedação com papel PARA-FILM).

Fig. 3.4 - RESPIRÔMETRO ALTERNATIVO
(adaptado pelo autor)

3.3.6. Vidraria, utensílios de laboratório e outros

Foram utilizadas as vidrarias normais de laboratório, em especial: bequer, “Erlenmeyer”, buretas, balões volumétricos, pipetas volumétricas, pipetas graduadas, pipetas automáticas, provetas, cápsulas de porcelana, pérolas de vidro, vidros de relógio, bastões de vidro, seringa de 10 ml, além de outros materiais e utensílios tais como: recipiente para armazenar água destilada, idem p/ água destilada isenta de CO₂ (c/filtro de cal sodada), presilhas de Mohr; pinças; luvas de amianto; piscetas; lã de vidro; algodão; papel absorvente; papel alumínio; papel especial para vedação (PARA-FILM); adesivo epoxi; gel de silicone para vedação; amostrador para coleta de amostras do solo e das misturas solo-lodo e ancinho de jardinagem p/ manipulação ou revolvimento do solo e misturas solo-lodo.

3.3.7. Principais reagentes

Utilizaram-se os seguintes reagentes: ácido clorídrico concentrado (puro para análise “p.a.”); ácido ortofosfórico concentrado (p.a); ácido sulfúrico concentrado (p.a); água destilada; água destilada isenta de CO₂; cal sodada; carbonato de cálcio (p.a); carbonato de sódio (p.a); cloreto de bário (p.a); dicromato de potássio (p.a); difenilamina (p.a); etanol (p.a); fenolftaleína (p.a); ftalato ácido de potássio (p.a); hidróxido de potássio (p.a); sulfato ferroso amoniacal (p.a) e vermelho de metila (p.a).

3.4 - Caracterização preliminar e monitoramento do solo

3.4.1 - Preparo do solo para caracterização

3.4.1.1 - Coleta de solo na origem

No caso desta pesquisa, o solo utilizado já se encontrava desestruturado e amontoado, apresentando-se bem homogeneizado. Por essa razão não houve necessidade de

seguir os procedimentos normais de coleta e seleção (divisão de áreas, quarteamentos, etc.) comumente utilizados no caso de coleta de solos naturais.

3.4.1.2. - Obtenção da TFSA (terra fina seca ao ar)

A TFSA deve ser utilizada, de acordo com o projeto de norma de respirometria (ABNT, 1993), tanto nos ensaios para caracterização do solo, quanto no ensaio de respirometria. Por esse motivo, o solo colocado nas cubas foi a TFSA, de modo que as amostras coletadas posteriormente já se encontrassem livres de torrões, de dimensões indesejadas. Seguem os procedimentos, segundo a (ABNT, 1993), para obtenção da TFSA:

- espalhar o solo em superfície plana, precavendo-se contra eventuais contaminações com outros solos existentes no laboratório;
- deixar secar à temperatura ambiente (evitar secagem completa);
- peneirar em malha # 2,0 mm, eliminando o material retido, após operação em que eventuais torrões tenham sido desagregados;
- para os ensaios de caracterização, acondicionar em sacos plásticos (a 40° C). Pode ser guardado por, no máximo 1 mês.

3.4.2 - Determinação da massa específica aparente (solo solto)

Após a montagem do sistema de drenagem da cuba (Fig. 3.2), constituído de tubulação dotada de válvula, brita, bidim e areia, e antes da colocação do solo, foram adotados os seguintes procedimentos, propostos pelo autor, para uma determinação expedita da massa específica aparente do solo solto (TFSA).

- promovida a lavagem do sistema com água comum de torneira;
- para manter a areia na altura desejada, colocou-se mais areia, quando necessário, sendo que a lavagem foi repetida até que a água drenada apresentasse um aspecto límpido na saída;

- demarcada a altura desejada para o solo (0,15m acima da areia);
- após o fechamento do registro do sistema de drenagem, colocou-se água até saturar todo o sistema (água começando a aflorar na superfície da areia);
- em seguida, foi preenchido com água o espaço destinado ao solo e medido o volume de água gasto nessa operação, com isso foi possível obter o volume real a ser preenchido com o solo (TFSA);
- drenada toda a água, foi colocado o solo no espaço a ele destinado, tendo-se o cuidado de pesá-lo antes da colocação, Assim pôde-se calcular, de forma expedita, a massa específica " γ " da TFSA (solta), de acordo com a expressão 3.1.

$$\gamma = \frac{\text{PESO DA TFSA}}{\text{VOLUME REAL}} \quad (\text{em kg/m}^3) \quad (3.1)$$

- o cálculo da massa específica seca do solo " γ_s ", foi feito com prévia determinação do teor de umidade " h " (%) desse solo e de acordo com a expressão 3.2.

$$\gamma_s = \frac{1}{1 + h/100} \times \gamma \quad (\text{em kg/m}^3) \quad (3.2)$$

3.4.3 - Determinação da capacidade de campo do solo

As amostras de solo foram coletadas nas respectivas cubas. Para esta e todas as demais determinações, em que foi necessária a coleta de amostras das cubas, foi utilizado um amostrador, adaptado a partir de tubo de PVC branco (utilizado para esgoto), com 50 mm de diâmetro e 0,30 m de comprimento, tendo a ponta serrilhada para facilitar a penetração no solo, com marcação externa a 0,15m, para indicar a profundidade de penetração no solo.

Na determinação da capacidade de campo do solo, foi adotado um procedimento de laboratório, utilizando-se o aparelho denominado "Membrana de Richards",

descrito por **REICHARDT (1985)**, com o qual foram obtidos os dados para o traçado da "curva de retenção de água no solo". Essa curva apresenta, para cada ponto de pressão aplicada no aparelho, o teor de umidade residual correspondente. De posse desses valores e conhecida a textura do solo, foram definidas a tensão e a umidade correspondentes à sua capacidade de campo.

3.4.4 - Determinação do valor de pH e da curva de neutralização do solo

As amostras de solo ou das misturas solo-lodo foram coletadas nas respectivas cubas. Os procedimentos para determinação do valor de pH e da curva de neutralização do solo, também aplicáveis às misturas solo-lodo, foram descritos respectivamente em 3.4.4.1. e 3.4.4.2 e seguem o projeto de norma de respirometria (**ABNT, 1993**).

As coletas de amostras, para as citadas análises, foram feitas a cada 3 ou 4 semanas. A prévia correção do pH do solo original, conforme prevê a metodologia constante no projeto de norma (**ABNT, 1993**), foi desnecessária, pois as medidas de pH feitas no solo de origem revelaram valores bem próximos do pH neutro, dentro da faixa ótima para a biodegradação.

3.4.4.1 - Procedimentos para determinação do "pH" do solo

- pesar ($10 \pm 0,1$) g de solo e colocar em um bequer de 40 ml;
- com uma proveta adicionar 25 ml de água destilada isenta de CO_2 ;
- agitar com um bastão de vidro por 15 minutos;
- deixar em repouso por 1 hora;
- medir o pH, mantendo o eletrodo de vidro ou a parte correspondente de um eletrodo combinado, em contato com o sedimento - o eletrodo de referência deve ficar no líquido sobrenadante;
- a amostra não deve ser agitada.

3.4.4.2 - Procedimentos para determinação da curva de neutralização do solo

- pesar ($10 \pm 0,1$) g da amostra para cada ponto da curva de neutralização e adicionar as seguintes massas de CaCO_3 (carbonato de cálcio): 0 (controle); 5 mg; 10 mg; 20 mg; 50 mg e 100 mg; 500 mg e 1000 mg.
- homogeneizar as amostras e cobri-las com papel alumínio, para evitar ressecamento;
- deixar em repouso por 1 semana e, após esse período, medir o pH de cada amostra.

Obs.: Considerar o valor de neutralização (VN), a menor massa de CaCO_3 , necessária para que o valor de pH das 10 g de solo se aproxime de 7,0. Neste caso, os dados foram levantados para uma amostra coletada na cuba 5, após a 3ª reaplicação de lodo.

3.4.5 - Determinação do teor de umidade e do teor de sólidos voláteis do solo

3.4.5.1 - Amostragem

Para essas análises, as amostras de solo ou da mistura solo-lodo, foram coletadas a cada 3 ou 4 semanas, nas respectivas cubas.

3.4.5.2 - Procedimentos

- tomar uma cápsula de porcelana, secar em mufla a 550°C , esfriar em dessecador até temperatura ambiente e pesa-se (M_1);
- anotar o peso do conjunto cápsula de porcelana + 10g da amostra de solo ou da mistura solo-lodo (M_2);
- secar em estufa a 105°C , por 1 (uma) hora, esfriar em dessecador até temperatura ambiente e pesar, repetindo-se essa operação até obter o peso constante (M_3);
- levar o conjunto à mufla, sob temperatura de 550°C , por 1 (uma) hora, esfriar em dessecador até temperatura ambiente e pesar (M_4).

3.4.5.3 - Cálculos

$$h = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_1} \times 100 \quad (\%) \quad (3.3)$$

$$SV = \frac{M_3 - M_4}{M_3 - M_1} \times 100 \quad (\%) \quad (3.4) \quad \text{onde:}$$

h = teor de umidade do solo ou da mistura solo-lodo

SV = teor de sólidos voláteis do solo ou da mistura solo-lodo.

3.4.6 - Determinação do teor de carbono orgânico “C” e matéria orgânica “MO” do solo

Para essas análises, as amostras de solo ou da mistura solo-lodo foram coletadas nas respectivas cubas, a cada 3 ou 4 semanas. Essas amostras foram colocadas para secagem ao ar, por no mínimo 24 horas. Foi adotado o método descrito por CAMARGO et al. (1986), a seguir apresentado:

3.4.6.1 - Preparo de reagentes e soluções

- **solução padrão de dicromato de potássio 1 N:** dissolver 49,04g do sal $K_2Cr_2O_7$, (p.a), seco em estufa a 105°C, em água destilada, completando o volume a 1 litro;
- **ácido sulfúrico concentrado p.a. (no mínimo a 96%);**
- **ácido ortofosfórico concentrado p.a (85%);**
- **solução de sulfato ferroso amoniacal 0,5 N:** dissolver 196,07g do sal $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ (p.a), em 800 ml de água destilada. Adicionar 20 ml de ácido sulfúrico concentrado e completar o volume a 1 litro, utilizando um balão volumétrico. Filtrar com algodão. Titular essa solução cada vez que for utilizá-la;

- **difenilamina 1%:** dissolver 1g do indicador (p.a), em 100ml de ácido sulfúrico concentrado.

3.4.6.2 - Procedimentos

- transferir 1g de solo (TFSA) para um “Erlenmeyer” de 500 ml; para solos com altos teores de matéria orgânica (coloração escura), utiliza-se uma menor quantidade, sendo que nesta pesquisa utilizou-se 0,8 g, após testes conduzidos durante a 1ª fase;
- adicionar 10 ml da solução de dicromato de potássio 1N e, imediatamente a seguir, 20 ml de ácido sulfúrico concentrado, p.a.;
- agitar por um minuto com uma leve rotação manual do “Erlenmeyer”, evitando que o solo fique aderente às suas paredes;
- deixar a suspensão em repouso por 30 minutos e adicionar 200 ml de água destilada, 10 ml de ácido ortofosfórico concentrado e oito gotas da solução de difenilamina 1%;
- titular com a solução de sulfato ferroso amoniacal 0,5N até a viragem do azul para o verde;
- proceder de modo semelhante com 10 ml da solução de dicromato (branco), para possibilitar a determinação da normalidade real da solução de sulfato ferroso amoniacal.

3.4.6.3 - Cálculos

$$f = \frac{m_{eq} \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}{m_{eq} \text{ sulf. ferr. amon.}} = \frac{10 \times 1}{V_1 \times 0,5} \quad (3.5)$$

$$C = \frac{[10 - (V_2 \times f \times 0,5)] \times 0,4}{p} \quad (\text{em } \%) \quad (3.6)$$

$$\text{M.O.} = C \times 1,725 \quad (\text{em } \%) \quad (3.7) \quad \text{onde:}$$

f	fator de correção da normalidade do sulfato ferroso amoniacal;
V₁	volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação do branco (em ml);
C	teor de carbono da amostra (em %);
V₂	volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra (em ml);
p	peso da amostra (em g);
M.O	teor de matéria orgânica da amostra (em %).

3.4.7 - Determinação da curva granulométrica e da textura do solo

Para determinação da curva granulométrica foi utilizado o Método M6-61 (DER-SP, 1974) "Análise granulométrica de solos por peneiração e sedimentação (Processo do densímetro)". A partir da curva granulométrica pôde-se determinar a textura do solo em questão, utilizando-se o "Triângulo para determinação das classes texturais" do USDA (MEDINA, 1975).

3.4.8 - Determinação do teor de macro-nutrientes no solo (N, P, K, Ca e Mg)

Essas análises foram feitas no Instituto Agronômico de Campinas "IAC", através de metodologias ali praticadas, a seguir explicitadas.

3.4.8.1 - Determinação do nitrogênio (disponível)

- IAC (1992) - Determinação do N inorgânico (NH_4^+ e NO_3^-) em solo, pelo método da destilação a vapor.
- IAC (1992) - Determinação do índice de disponibilidade de nitrogênio (N - NH_4^+), pelo método do KCl a quente.

3.4.8.2 - Determinação de fósforo, potássio, cálcio e magnésio.

Foi feito através dos procedimentos apresentados por **RAIJ et al. (1987)**.

3.5 - Caracterização preliminar do lodo

3.5.1 - Teor de umidade " h_L "; teor de sólidos totais " ST_L "; teor de sólidos totais fixos " STF_L "; teor de sólidos totais voláteis " STV_L "; concentração de sólidos " C_{SL} " e massa específica do lodo " γ_L ".

Foram utilizados os procedimentos previstos no Standard Methods **APHA (1989)**. Os ensaios foram realizados a cada aplicação de lodo no solo.

3.5.2 - Determinação do valor de pH do lodo

- colocar 50 ml de amostra do lodo líquido, em 1 bequer de 100 ml;
- determinar o pH por processo eletrométrico, com agitação da amostra.

3.5.3 - Determinação do teor de carbono e de matéria orgânica do lodo

3.5.3.1 - Preparo da amostra

- secar o lodo líquido (aprox. 200 ml) em banho-maria e posteriormente em estufa a 105°C ;
- pesar 0,25 g de amostra e colocar em um bequer de 500ml;

3.5.3.2 - Procedimentos de análise

Para a determinação do teor de carbono, foi utilizado o mesmo procedimento descrito para o solo (item 3.4.6).

3.5.4 - Teor de elementos poluentes no lodo

Foram determinadas as concentrações (em mg do elemento por kg de lodo, em bases secas), para os seguintes elementos: **As, Al, Fe, V, Cr, Co, Ni, Zn, Cd, Pb, Mn, Cu, Mg, Ca, Ti, Mo e Ba**, utilizando-se o equipamento conhecido como ICP - “Inductively Coupled Argon Plasma Emission Spectrometry”. As amostras foram preparadas com ácido nitroperclórico, pelo método 3050 - Digestão Ácida de sedimentos, lodos e solos, na preparação de amostras para análise de metais, com utilização de espectrofotômetros **USEPA (1986)**. Os elementos: **As, Cr, Ni, Zn, Cd, Pb, Cu e Mo** fazem parte da lista da **USEPA** (ver Tab. 2.2), para os quais existem limitações quando do lançamento de lodo no solo.

3.6 - Preparação das amostras para o ensaio de respirometria

A premissa básica desta pesquisa foi o estudo da degradação do lodo no solo, através do ensaio de respirometria. Outra premissa é que a aplicação do lodo no solo fosse feita com o lodo em estado líquido. Em função dessas premissas, houve necessidade de adaptações dos procedimentos previstos no projeto de norma (**ABNT, 1993**) que foram originalmente elaborados para resíduos parcialmente desidratados. Estudou-se então uma forma de desidratar o lodo, de maneira que as recomendações contidas no projeto de norma pudessem ser seguidas, mas, ao mesmo tempo, ficassem resguardadas as características físicas, químicas e biológicas do lodo, principalmente em termos de nutrientes solúveis.

O projeto de norma (**ABNT, 1993**), prevê que se coloque o solo (TFSA) no respirômetro, em seguida o resíduo e água destilada para correção da umidade. Isso permite, para resíduos com baixos teores de umidade, que se faça o controle do teor de umidade da

mistura, quando da incubação, considerando-se que a umidade ótima para o crescimento biológico no solo está situada numa faixa de 50 a 70% da capacidade de campo desse solo. Para atendimento dessas condições, foram aventadas duas alternativas para a desidratação do lodo.

3.6.1 - 1ª Alternativa - Filtragem do lodo em kitassato

Com a filtragem do lodo líquido em um kitassato, os sólidos retidos poderiam ser aplicados, a diferentes taxas, no solo a ser incubado nos respirômetros. No entanto, essa alternativa acabou sendo descartada por vários motivos:

- os nutrientes solúveis seriam perdidos na filtragem;
- haveria necessidade de se filtrar um grande volume de lodo para obtenção da quantidade de sólidos desejada (tarefa bastante trabalhosa e morosa);
- por último, sem as cubas para aplicação de lodo perder-se-ia a oportunidade de amostragem periódica, que a utilização desse protótipo proporciona.

3.6.2 - 2ª Alternativa - Montagem de cubas para aplicação de lodo no solo

A montagem de cubas para aplicação do lodo líquido ao solo, nas taxas desejadas, aproxima-se mais das condições reais de campo. Permite, com algumas adaptações, o pleno atendimento ao citado projeto de norma, além de propiciar a coleta periódica de amostras. Por todos esses motivos esta 2ª alternativa foi adotada.

3.6.2.1 - Procedimentos adotados na 2ª fase

Para o monitoramento do solo-controle e para cada taxa de aplicação de lodo prevista (5, 10 e 15 tds/ha), foram montados 4 protótipos específicos, denominados respectivamente cubas 0, 5, 10 e 15. Excetuando-se a cuba 0, cuja área superficial era de aproximadamente $0,18 \text{ m}^2$, nas demais cubas essa área era de $0,26 \text{ m}^2$. A utilização de cubas

de plástico, em vez de uma área no próprio solo, teve por finalidade manter o controle da drenagem do percolado, uma vez que outros pesquisadores se utilizaram desse efluente para a elaboração de suas pesquisas.

As cubas foram instaladas a céu aberto, visando a expor o solo-controle e as misturas solo-lodo às intempéries, de modo que estes ficassem submetidos aproximadamente às mesmas condições que poderiam ocorrer num caso real de campo. Nesta pesquisa, as cubas tiveram as seguintes finalidades:

- permitir a drenagem e/ou evaporação do excesso de líquido (desidratação parcial do lodo), possibilitando, assim, a tomada de amostras da mistura solo-lodo, para o ensaio de respirometria;
- permitir a amostragem periódica do solo-controle e das misturas solo-lodo, para as demais análises de acompanhamento da degradação, ao longo do tempo (pH, teor de umidade, teor de sólidos voláteis, teor de carbono e teor de matéria orgânica).

Após a aplicação de lodo nos solos contidos nas cubas 5, 10 e 15, aguardou-se a drenagem/evaporação do excesso de líquido, por um período de tempo da ordem de 24 horas. Com esse procedimento foi possível obter, na superfície do solo, uma camada de lodo parcialmente desidratada e relativamente uniforme. Foi então possível fazer a coleta da mistura solo-lodo, até a profundidade de 0,15m, tendo sido utilizado o amostrador descrito no item 3.4.3. O material coletado foi devidamente homogeneizado, seguindo-se a secagem ao ar por um período de tempo de aproximadamente 72 horas. Foi determinado o teor de umidade remanescente, das amostras secas ao ar, visando não só a determinar o peso úmido a ser colocado no respirômetro, mas também a propiciar o cálculo do volume de água a ser utilizado para eventual correção da umidade (ver item 3.7.3.4). Para cada tratamento utilizado (as 3 diferentes taxas utilizadas, reaplicações na cuba 5 e respectivos solos-controle), os respirômetros foram sempre montados em triplicata, pesando-se para cada unidade 50 ($\pm 0,1$)g da amostra (em bases secas), tendo sido colocado esse material nos respectivos respirômetros, sobre a porção de água destilada, utilizada para a correção do teor de umidade.

Para os respirômetros montados com a mistura solo-lodo, coletada na cuba 15, o teor de umidade remanescente ($h = 36\%$), mesmo após secagem ao ar, durante 3 dias, ficou acima da capacidade de campo do solo (estimada em cerca de 30%, através dos dados de teor de umidade obtidos nas cubas da 1ª fase). Por esse motivo a mistura solo-lodo foi incubada nesses respirômetros com teor de umidade de 36 %, enquanto que os demais respirômetros foram todos incubados com teor de umidade de 21 % (70% da capacidade de campo estimada).

Para os respirômetros montados na 1ª fase, não houve correção da umidade, ou seja, o material foi incubado com a umidade de coleta e com valores superiores à capacidade de campo do solo.

3.6.2.2 - Cálculo do volume de lodo lançado nas cubas

A determinação do volume de lodo lançado nas respectivas cubas, de acordo com as taxas desejadas (5, 10 e 15 tds/ha), foi feita utilizando-se os métodos de cálculos, a seguir apresentados.

Na cuba “5”, as 5 aplicações de lodo foram feitas com taxa de 5 tds/ha = 0,5 kg/m² de sólidos secos. Considerando-se que essa cuba tem área superficial de 0,26 m², foi possível calcular a taxa na cuba “T_C”, correspondente a 130 gramas de sólidos secos, para cada aplicação. Da mesma forma, para a taxa de 10 tds/ha, obteve-se T_C = 260 gramas de sólidos secos e para a taxa de 15 tds/ha obteve-se T_C = 390 gramas de sólidos secos aplicados.

Determinando-se previamente a concentração de sólidos no lodo “C_{SL}”, em g/l (conforme procedimentos apresentados no item 3.5.1), foi possível calcular o volume de lodo a ser lançado “V_L” (em litros), através da expressão 3.8.

$$V_L = \frac{T_C}{C_{SL}} \quad (3.8)$$

3.7 - Ensaio de Respirometria

3.7.1 - Descrição sumária do método

Nos respirômetros (ver Fig. 3.3 e 3.4), fizeram-se as medidas de geração de CO_2 , tanto do solo-controle, quanto da mistura solo-lodo. O CO_2 é decorrente da degradação aeróbia da matéria orgânica no solo. No respirômetro, o CO_2 é absorvido pela solução de KOH, colocada em seu interior. A titulação do KOH, com HCl, após decorrido determinado período de tempo de incubação, permite o cálculo da quantidade de CO_2 gerada no processo naquele período de tempo considerado, tendo-se a precaução de se fazer um teste em branco do KOH, antes da colocação no respirômetro.

O intervalo de tempo entre uma titulação do KOH e outra foi sendo fixado a partir dos resultados obtidos. Deve-se evitar que o pH da solução alcalina (KOH), atinja um valor $\leq 8,3$, durante o intervalo entre as medições. Teoricamente esse é o ponto de viragem da fenolftaleína. Isso pode acontecer quando se passa longos períodos de tempo sem fazer a análise, ou então quando há intensa degradação da matéria orgânica e, conseqüentemente, excessiva geração de CO_2 . A incorporação de CO_2 ao KOH, faz o pH dessa solução baixar, às vezes ultrapassando o ponto de viragem da fenolftaleína. Por esse motivo, no início do período de incubação, essas análises foram feitas a cada 2 dias, aumentando-se esse tempo gradativamente, pois, ao longo do processo, há uma diminuição progressiva na geração de CO_2 . Ao final do processo as análises puderam ser realizadas a cada 15 dias.

3.7.2 - Preparo de reagentes

3.7.2.1 - Água destilada isenta de CO_2 (AD- CO_2)

- deve-se ferver água destilada por 0,5 hora;
- esfriar em recipiente com filtro de ascarita (ou cal sodada);
- guardar em recipiente com filtro de ascarita (ou cal sodada).

3.7.2.2 - Solução de hidróxido de potássio (KOH - 0,4 N)

- pesar 22,4 g de KOH (p.a) e dissolver em 1000 ml de água isenta de CO₂;
- manter em recipientes de plástico, com filtro de ascarita ou de cal sodada;
- padronizar, utilizando 100 ml de solução 0,2 N de ftalato ácido de potássio, com indicador vermelho de metila (2 gotas) e calcular a normalidade real do KOH " N_{KOH} ", através da expressão 3.9.

$$N_{\text{KOH}} = \frac{100 \times 0,2}{V_2} \quad (3.9) \quad \text{onde:}$$

100 = volume de ftalato ácido de potássio utilizado (em ml);

0,2 = normalidade do ftalato ácido de potássio;

V_2 = volume de KOH gasto na viragem de vermelho para amarelo (em ml) .

3.7.2.3 - Solução padrão de ftalato ácido de potássio (C₆H₄COOK.COOH - 0,2 N)

- secar o ftalato, em estufa a 110-120°C, por 30 minutos;
- esfriar em dessecador até temperatura ambiente;
- pesar 40,860g ($\pm 0,1$) mg de ftalato (p.a);
- completar em balão volumétrico a 1000 ml com água destilada;
- guardar em recipiente de vidro.

3.7.2.4 - Solução de ácido clorídrico (HCl - 0,2 N)

- medir 17,0 ml de HCl concentrado p.a.;
- completar para 1000 ml em balão volumétrico, com água destilada;
- padronizar com 100 ml de solução de carbonato de sódio 0,1 N, usar 2 gotas de vermelho de metila como indicador e calcular a normalidade real do HCl " N_{HCl} " (expressão 3.10).

$$N_{\text{HCl}} = \frac{100 \times 0,1}{V_2} \quad (3.10) \quad \text{onde:}$$

100 = volume de carbonato de cálcio utilizado na titulação (em ml);

0,1 = normalidade do carbonato de sódio;

V_2 = volume de HCl gasto na viragem de amarelo para vermelho (em ml).

3.7.2.5 - Solução padrão de carbonato de sódio (Na_2CO_3 - 0,1 N):

- secar o carbonato de sódio (em pó), na mufla a 270°C por 1 hora e esfriar em dessecador até temperatura ambiente;
- pesar 5,300 g ($\pm 0,1$)mg de carbonato de sódio (p.a), dissolver em 500 ml de AD- CO_2 a 15°C , completar em balão volumétrico a 1000 ml com AD- CO_2 e guardar em recipientes de plástico.

3.7.2.6 - Solução de Cloreto de Bário ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - 1,0 N):

- pesar 12,2g de cloreto de bário (p.a), completando-se para 100 ml, com AD- CO_2 ;
- guardar em recipiente de plástico.

3.7.2.7 - Solução indicadora de vermelho de metila:

- pesar 0,2 g de vermelho de metila (p.a) e dissolver em 60 ml de etanol p.a.;
- completar com água destilada para 100 ml e filtrar com algodão.

3.7.2.8 - Solução indicadora de fenolftaleína

- dissolver 5 gramas de fenolftaleína (p.a) em 500 ml de etanol p.a.;
- adicionar 500 ml de água destilada, com agitação constante;
- filtrar com algodão, se aparecer um precipitado.

3.7.3 - Procedimentos para o Ensaio de Respirometria

3.7.3.1 - Ajuste do valor de pH do solo

- o projeto de norma (ABNT, 1993) prevê, quando necessário, que o valor de pH do solo deve ser corrigido para pH próximo ao neutro, de acordo com os procedimentos previstos no item 3.4.4.2;
- prevê ainda que, se o solo for corrigido, deve-se deixá-lo em repouso por um período de pelo menos 1 semana, de forma a evitar interferências no equilíbrio de CO₂, bicarbonatos e carbonatos. Pelos motivos expostos no item 3.4.4.2 não foi necessário ajustar o valor de pH do solo originalmente utilizado.

3.7.3.2 - Preparo da mistura solo-lodo

- utilizando-se a cuba de lançamento de lodo (Fig. 3.2), foi lançado o lodo líquido ao solo, na taxa desejada;
- aguardou-se a drenagem/evaporação, por um período de 18 a 24 horas;
- fez-se a coleta da mistura solo-lodo, até uma profundidade máxima de 15 cm;
- tomou-se uma certa quantidade de amostra de cada cuba (foi suficiente 3 vezes o volume do amostrador), para incubar os respirômetros em triplicata e realizar os demais ensaios;
- pesaram-se 10 ($\pm 0,1$) g, para determinação do teor de umidade (h) e do teor de voláteis (SV), conforme item 3.4.5;
- uma parte da amostra foi deixada para secagem ao ar (cerca de 72 horas);
- foi determinado o teor de umidade da amostra seca ao ar;
- pesou-se (50 $\pm$ 0,1)g em bases secas, para incubação de cada respirômetro, corrigindo para peso úmido, levando em conta o teor de umidade da mistura, conforme item 3.7.3.4;
- pesaram-se 10 ($\pm 0,1$) g, para determinação do valor de pH da amostra, item 3.4.4.1.

3.7.3.3 - Balanceamento de Nutrientes

Não foi feita adição de nutrientes, uma vez que uma das características do lodo de esgotos municipais é possuir uma certa percentagem desses elementos.

3.7.3.4 - Ajuste do teor de umidade do solo e da mistura solo-lodo

Para se considerar um peso seco de solo de 50 gramas em cada respirômetro deve-se determinar o teor de umidade remanescente das amostras secas ao ar “h” (em %). Com isso pode-se calcular o peso úmido de solo “Pu”, a ser colocado no respirômetro, através da expressão 3.11. A correção da umidade para 70% da capacidade de campo “Cc” desse solo foi feita calculando-se o peso de água a ser acrescentado “Pa”, através da expressão 3.12.

$$P_u = [50 \times (1 + h/100)] \quad (\text{em g}) \quad (3.11)$$

$$P_a = [1 + (0,70 \times Cc/100)] \times 50 - P_u \quad (\text{em g}) \quad (3.12)$$

3.7.3.5 - Montagem dos Respirômetros

a) Colocação das amostras previamente preparadas no respirômetro

De acordo com o projeto de norma de respirometria (ABNT, 1993), foi prevista, para cada tratamento (misturas solo-lodo ou solo-controle), a montagem de respirômetros em triplicata, seguindo-se os procedimentos:

- pesar e colocar a amostra a ser incubada, no compartimento do respirômetro a ele destinado;
- fazer a correção de umidade, colocando a água antes do solo;
- instalar o filtro na parte superior do respirômetro, devidamente preenchido com cal sodada, mantendo-se a válvula de ventilação na posição fechada e a rolha colocada;
- para os respirômetros alternativos (Fig. 3.3), o bequer de 40 ml deve ser instalado no fundo do vidro, após a colocação da mistura solo-lodo.

b) Sistema de absorção de CO₂ (solução de KOH)

- adicionar 10,0 ml da solução de KOH ao braço lateral do respirômetro ou no bequer (caso do respirômetro alternativo) e vedar a cânula, utilizando papel "PARA-FILM".

c) Respirômetros do solo-controle

- preparados 3 respirômetros, que foram montados com o solo-controle (amostra retirada da cuba "0"). No caso da cuba 5, onde foram feitas 4 reaplicações de lodo, o solo-controle correspondente a cada uma delas foi coletado nessa mesma cuba, antes de cada reaplicação.

d) Incubação dos Respirômetros

- os respirômetros foram hermeticamente vedados (utilizando-se gel de silicone e papel "PARA-FILM") e permaneceram incubados a $(28 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, por um período de tempo de aproximadamente 6 (seis) meses.

e) Determinação da quantidade de CO₂ produzido

Para cada respirômetro, a determinação da quantidade de CO₂ produzido no período considerado, fez-se, através dos seguintes procedimentos:

- preparar, para cada respirômetro, um “Erlenmeyer” de 100 ml, adicionar duas gotas de fenolftaleína e 1 ml da solução de cloreto de bário ($\text{BaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ - 1N);
- retirar a rolha de borracha e aberta a válvula do filtro de ascarita;
- remover a vedação da cânula do braço lateral do respirômetro e com uma seringa de 10 ml, transferir a solução de KOH do braço lateral para o “Erlenmeyer”;
- preencher a seringa com 10 ml de água (AD-CO_2), injetar no braço lateral do respirômetro para lavagem do mesmo, e com a mesma seringa, transferir a água de lavagem para o “Erlenmeyer”;
- repetir essa lavagem por mais duas vezes, completando-se 30 ml de AD-CO_2 e titular imediatamente;
- titular o conteúdo do erlenmeyer com HCl - 0,2 N, após determinação da normalidade real; o ácido deve ser introduzido rapidamente no início da titulação e mais lentamente quando próximo do ponto de viragem da fenolftaleína, anotando-se a quantidade de ácido gasta;
- ainda com a cânula do braço lateral aberta, injetar ar comprimido, com uma bomba de ar tipo aquário, o ar deve passar através do filtro de cal sodada (cuja função é reter o CO_2 do ar introduzido), de forma a garantir a reoxigenação do sistema, sem, no entanto, permitir a entrada de CO_2 ;
- com outra seringa de 10 ml, adicionar 10 ml de uma nova solução de KOH - 0,4 N, no compartimento a ele destinado (braço lateral do respirômetro);
- recolocar a vedação da cânula no braço lateral, fechar a válvula e recolocar a rolha de borracha do filtro de cal sodada;
- após esses procedimentos, retornar cada respirômetro para a estufa de incubação, até a próxima determinação;
- visando servir como base de cálculos, para a próxima determinação do CO_2 incorporado, preparar uma prova em branco, contendo:
 - . 10 ml de solução KOH - 0,4 N, adicionados com seringa de 10 ml;
 - . 2 gotas de fenolftaleína;
 - . 1 ml de solução de cloreto de bário ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - 1N);
 - . 30 ml de água (AD-CO_2);

- titular essa solução com HCl - 0,2 N, normalidade real conhecida, anotando-se a quantidade de ácido necessária até a viragem da fenolftaleína (ou pH 8,3).

3.7.3.6 - Apuração dos resultados

Na falta de uma sigla simplificada, de uso corrente, para os resultados obtidos através do ensaio de respirometria, a exemplo da sigla **DBO** - “**D**emanda **B**ioquímica de **O**xigênio”, quando se analisa a biodegradação em meios aquosos, sugere-se e utiliza-se nesta pesquisa, a sigla “**GRGC**” - **G**eração **R**espirométrica de **G**ás **C**arbônico”.

Para cada respirômetro onde foi incubada a mistura solo-lodo, ou mesmo o solo-controle, a determinação da **GRGC individual de cada respirômetro** “**GRGC_{IND.}**” para o período entre duas medições consecutivas foi calculada pela expressão 3.13:

$$GRGC_{IND.} = (A - B) \times \frac{N_{HCl}}{N_{KOH}} \times 100 \times 0,044 \quad (\text{em mg de CO}_2) \quad (3.13) \quad \text{onde:}$$

- A** = volume de HCl gasto para titular o branco (em ml);
- B** = volume de HCl gasto para titular o KOH, retirado do respirômetro (em ml);
- 100** = fator para transformar equivalente em μmol de CO_2 ;
- 0,044** = fator para transformar μmol de CO_2 em mg de CO_2 ;
- N_{HCl}** = normalidade real do HCl - 0,2 N (ver item 3.7.2.4);
- N_{KOH}** = normalidade real do KOH - 0,4 N (ver item 3.7.2.2).

Utilizando-se os valores individuais de cada respirômetro **GRGC_{IND.}**, a cada medição efetuada pode-se determinar, através da expressão 3.14, a **GRGC individual acumulada** “**GRGC_{IND. ACUM.}**”:

$$GRGC_{IND. ACUM.} = \sum GRGC_{IND.} \quad (\text{em mg de CO}_2) \quad (3.14)$$

Utilizando-se da média aritmética dos valores de $GRGC_{IND.}$, para cada grupo de 3 respirômetros " $GRGC_{MED.}$ ", em cada medição efetuada, pode-se determinar, através da expressão 3.15, a **GRGC média acumulada** " $GRGC_{MED. ACUM.}$ ":

$$GRGC_{MED. ACUM.} = \sum GRGC_{MED.} \quad (\text{em mg de CO}_2) \quad (3.15)$$

Utilizando-se a $GRGC_{MED. ACUM.}$ e o tempo acumulado de incubação correspondente " T_{AI} ", pode-se determinar, através da expressão 3.16, a **GRGC média diária** " $GRGC_{MED. DIÁRIA}$ ":

$$GRGC_{MED. DIÁRIA} = \frac{GRGC_{MED. ACUM.}}{T_{AI}} \quad (\text{em mg CO}_2 / \text{dia}) \quad (3.16)$$

Utilizando-se a média aritmética, para cada grupo de 3 respirômetros incubados com determinada mistura solo-lodo " $GRGC_{MED. MIST.}$ ", e a média obtida para o solo-controle $GRGC_{MED. CONTR.}$, a cada medição efetuada, pode-se determinar, através da expressão 3.17, a **GRGC média efetiva** " $GRGC_{MED. EFET.}$ ":

$$GRGC_{MED. EFET.} = GRGC_{MED. MIST.} - GRGC_{MED. CONTR.} \quad (\text{em mg de CO}_2) \quad (3.17)$$

Utilizando-se da $GRGC_{MED. EFET.}$ e acumulando-se esses valores a cada medição efetuada, pode-se determinar, através da expressão 3.18, a **GRGC média efetiva acumulada** $GRGC_{MED. EFET. ACUM.}$. Esse parâmetro, lançado num gráfico em função do tempo, permite visualizar o tempo necessário para estabilizar o acréscimo de matéria orgânica adicionada ao solo, pela aplicação do lodo.

$$GRGC_{MED. EFET. ACUM.} = \sum GRGC_{MED. EFET.} \quad (\text{em mg de CO}_2) \quad (3.18)$$

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos nesta pesquisa, estão compilados em tabelas e figuras e são apresentados no item 6 - ANEXOS. As tabelas no item 6.1 e as figuras no item 6.2.

4.1 - 1ª Fase - Aferição de Procedimentos

4.1.1 - Montagem dos protótipos na 1ª fase

Nessa fase foram montadas duas cubas provisórias, denominadas 0 e 15, com recipientes (latas) de 18 litros (ver item 3.2). Foi utilizado, em cada cuba, um volume de solo de aproximadamente 8,6 litros (pesando 8,25 kg).

Os resultados das análises de caracterização do solo na 1ª e 2ª fases são apresentados na **Tab. 6.1.1**. Esse solo apresentou, em termos granulométricos, um teor de areia da ordem de 50%, teor de argila de 35% e teor de silte de 15%. Utilizando-se o triângulo para classificação de solo do USDA, o solo em questão foi caracterizado como argilo-arenoso.. Apresentava cor escura e teor de matéria orgânica de 8,4 %.

4.1.2 - Aplicações de lodo na cuba 15 - 1ª fase

Na cuba "15" foram feitas duas aplicações, com o mesmo lodo, coletado em 15/09/94, na ETE Riacho Grande, município de São Bernardo do Campo - SP. Esse lodo ficou estocado em recipientes de plástico (estocagem anaeróbia, com preservação até a data da 1ª aplicação, a 4º C). O resultado das análises de caracterização do lodo, 1ª e 2ª fases, são apresentados na **Tab. 6.1.2**. A 1ª aplicação de lodo na cuba 15 ocorreu no dia 10/10/94. Foi utilizado um volume de lodo de 5,75 litros, com concentração de sólidos $C_{SL} = 16,65 \text{ g/l}$,

resultando numa taxa de aplicação aproximada de 16,5 tds/ha (a área superficial da cuba 15 era de aproximadamente 0,058 m²). Nessa mesma data, na cuba "0" (solo-controle), foram aplicados 5,75 litros de água destilada. A aplicação de água destilada nessa cuba teve por finalidade permitir comparações entre o teor de umidade remanescente no solo-controle e no solo que recebeu lodo, com amostras coletadas no dia seguinte (cerca de 24 horas após a aplicação). O teor de umidade do solo-controle era de 14,9%, na amostra coletada antes da aplicação de água e de 34,6 %, na amostra coletada no dia seguinte. O teor de umidade da amostra de solo coletada na cuba 15, antes da aplicação de lodo, era de 14,9%, e para a amostra da mistura solo-lodo, coletada no dia seguinte foi obtido 35,9% (**Tab. 6.1.3**).

A 2ª aplicação de lodo na cuba 15, foi realizada no dia 07/11/94 (28 dias após a 1ª aplicação), com taxa de aplicação aproximada de 13,5 tds/ha (totalizando cerca de 30 tds/ha no mesmo solo). Foram lançados 4,73 litros de lodo, com concentração de sólidos de 16,57 g/l. O teor de umidade da mistura solo-lodo era de 30,4% antes do lançamento, e de 47,3%, na amostra coletada 6 horas após o lançamento. Nessa data não foi lançada água destilada na cuba 0, nem determinado o teor de umidade do solo-controle (**Tab. 6.1.3**).

4.1.3 - 1ª fase - Monitoramento do solo-controle e das misturas solo-lodo (amostras coletadas nas cubas 0 e 15)

O monitoramento dos valores de pH, teor de umidade, teor de sólidos voláteis, teor de carbono e de matéria orgânica, do solo-controle e das misturas solo-lodo, ao longo do tempo, são apresentados na **Tab. 6.1.3**. Da análise desses dados, podem-se destacar alguns aspectos sobre as variações ocorridas, ao longo do tempo de monitoramento.

Durante o período de monitoramento da 1ª fase (170 dias), o valor de pH do solo-controle (cuba 0), que apresentava o valor inicial 6,8 apresentou na medição final o valor 5,8. Nesse mesmo período, o valor de pH da mistura solo-lodo, passou de 6,8 para 7,1 após receber a 1ª aplicação de lodo. Decorridos 25 dias esse valor tinha baixado para 6,2. Após a 2ª aplicação, 28 dias depois da 1ª, o valor do pH aumentou novamente para 6,7. Finalmente, após um período de tempo de mais 142 dias, baixou para 4,7. Comparando-se os valores de pH

iniciais e finais, em ambas as cubas, verifica-se uma tendência de acidificação do solo, ao longo do tempo, sendo esse fenômeno mais acentuado no solo que recebeu lodo (**Tab. 6.1.3**).

Após a 2ª aplicação de lodo na cuba 15 (1ª fase), os valores do teor de umidade "h" das amostras coletadas nessa cuba mantiveram-se mais altos do que no solo-controle, evidenciando uma maior retenção de água no solo que recebeu lodo. Nas quatro últimas determinações, essa diferença manteve-se variável numa faixa de 6,7 a 8,0% (**Tab. 6.1.3**).

Tanto na cuba 0 (solo-controle), quanto na cuba 15 (mistura solo-lodo), durante todo o período de monitoramento, os teores de umidade mantiveram-se sempre acima da **capacidade de campo "CC"** do solo, mesmo em períodos secos. O valor da CC, obtida para o solo controle nessa 1ª fase, foi de 21,5%. O solo foi coletado na cuba 0 em 10/10/94 e a CC determinada em laboratório, pelo método da membrana de Richards (**Tab. 6.1.5 e Fig. 6.2.1**). No entanto, segundo **REICHARDT (1985)**, os valores obtidos em laboratório, para a "CC" de solos, servem apenas como um primeiro balizamento, uma vez que esses ensaios não reproduzem de forma fiel as condições de campo. O motivo mais importante, segundo o A., é que, no laboratório ocorre uma desestruturação da amostra, sendo a estrutura um dos parâmetros mais importantes na retenção de água pelos solos. Os valores do teor de umidade obtidos nas amostras coletadas das cubas (**Tab. 6.1.3**) representariam melhor as condições de campo.

Ainda segundo **REICHARDT (1985)**, quando se pretende determinar a CC de um solo, nas condições de campo, deve-se determinar o teor de umidade do solo alguns dias após a ocorrência de uma chuva, que tenha proporcionado condições de saturação do solo em questão, ou em outras palavras, um teor de umidade maior do que a CC; o período de tempo recomendado para se fazer a medição após a chuva varia entre 3 dias (para solos arenosos) e 7 dias (para solos argilosos). Os resultados obtidos nesta pesquisa permitem afirmar que, para o solo utilizado, o valor obtido para a CC, em laboratório, é menor do que o valor que se obteria no campo. Analisando-se os dados da **Tab. 6.1.3** pode-se verificar que o solo-controle (nessa 1ª fase), apresentava, na data 0, um teor de umidade $h = 14,9\%$ (portanto antes de se aplicarem os 5,75 litros de água destilada, correspondentes a uma chuva de 99,1 mm). Os valores do teor de umidade medidos 24 horas e 7 dias após essa aplicação de água foram

respectivamente: $h_{24h} = 34,5\%$ e $h_{7 \text{ dias}} = 23,9\%$. Analisando-se a **Tab. 6.1.10**, verificamos que nesse período (de 10/10/94 a 17/10/94) não foram registradas chuvas. Portanto, o solo em questão (argilo-arenoso) deve apresentar um valor real para a CC maior que os 21,5%, obtidos pelo método da membrana de Richards e intermediário entre os dois valores obtidos nas cubas. Apenas para efeito de incubação dos respirômetros na 2ª fase, adotou-se o valor de 30% para a CC e um teor de umidade do solo para incubação de 21% (70% da CC).

O teor de sólidos voláteis "SV" das amostras do solo-controle, em 10 determinações, ao longo de 170 dias de monitoramento, apresentou valor médio de 13,0%, com desvio padrão de 0,7%.

Tentou-se correlacionar os parâmetros monitorados, em função do tempo, estudando ajustamentos a curvas do tipo: logarítmica, de potência, exponencial e linear. A correlação linear apresentou um índice de correlação "r", maior do que as outras curvas, mas também em muitos casos, bastante baixos. As equações estão sendo apresentadas, porém sua única utilidade seria atestar uma certa tendência de diminuição dos valores, ao longo do tempo, dada pelo sinal negativo no coeficiente multiplicativo da variável tempo.

Por exemplo, a correlação linear dos valores de "SV" (em %), obtidos para o solo-controle (cuba 0 - **Tab. 6.1.3**), em função do tempo "T" (em dias), mostra essa tendência de queda: $SV = 13,4 - 0,00634 T$, sendo o índice de correlação $r = - 0,49$.

O "SV" das amostras da mistura solo-lodo (cuba 15 - **Tab. 6.1.3**), em 7 determinações, feitas ao longo de 142 dias (computados apenas os valores determinados após o 2º lançamento de lodo), apresentou valor médio de 14,0 %, com desvio padrão de 0,5 % . A correlação linear desses valores, em função do tempo "T" (dias): $SV = 14,4 - 0,004428 T$, $r = - 0,43$, mostrou também uma tendência de queda.

O teor de carbono "C" das amostras do solo-controle (cuba 0 - **Tab. 6.1.3**), em 10 determinações, feitas ao longo de 170 dias, apresentou valor médio de 4,3 %, com desvio padrão de 0,5 % . A correlação linear $C = 4,68 - 0,00606 T$, com $r = - 0,74$, sendo "C" (em %), em função do tempo "T" (em dias), mostra também uma tendência de diminuição dos valores ao longo do tempo.

O teor de carbono "C" das amostras da mistura solo-lodo (cuba 15 - **Tab. 6.1.3**), em 7 determinações, ao longo de 142 dias (computando-se apenas os valores obtidos

após a 2ª. aplicação de lodo no solo), apresentou valor médio de 4,4%, com desvio padrão de 0,4% . A correlação linear de “C” (em %), em função do tempo “T” (em dias) mostra também uma tendência de queda $C = 5,03 - 0,007327 T$, com $r = - 0,92$.

A tendência de queda do teor de carbono ao longo do tempo já era esperada, em função da transformação da parcela de carbono orgânico biodegradável em CO_2 e também pelo efeito de lixiviação provocado pelas águas pluviais no solo das cubas.

O método utilizado para a determinação do teor de matéria orgânica prevê a sua obtenção, multiplicando-se o teor de carbono por 1,725 (ver **item 3.4.6.3**). Admite-se, com isso, que o elemento carbono, existente na matéria orgânica, seja responsável por cerca de 58% do seu peso total. Por ser um parâmetro calculado a partir do teor de carbono, os resultados obtidos para matéria orgânica seguem as mesmas tendências do teor de carbono, em termos de decréscimo ao longo do tempo. Obteve-se, para o solo-controle (cuba 0 - **Tab. 6.1.3**), em 10 determinações, ao longo de 170 dias, uma média de 7,4% , com desvio padrão de 0,8% e para as amostras da mistura solo-lodo (cuba 15 - **Tab. 6.1.3**), em 7 determinações, ao longo de 142 dias (computados apenas os valores determinados após a 2ª. aplicação de lodo), uma média de 8,0% , com desvio padrão de 1,0% .

4.1.4 - Monitoramento do solo-controle e das misturas solo-lodo (análises iniciais e finais das amostras incubadas nos respirômetros)

Os valores de pH, teor de umidade, teor de sólidos voláteis, teor de carbono e de matéria orgânica, medidos antes e após o período de incubação de cada respirômetro, são apresentados na **Tab. 6.1.4**. Analisando-se os dados obtidos, pode-se destacar:

Para um período de incubação de 176 dias (respirômetros da série 0 e 15) e 149 dias (respirômetros da série "30"), verifica-se que os valores de pH finais foram menores que os iniciais (**Tab. 6.1.4**). No entanto, o decréscimo foi menos acentuado do que nas amostras coletadas das cubas. Essa diferença talvez possa ser atribuída ao efeito de lixiviação, que ocorre nas cubas ao ar livre, por ocasião das chuvas e naturalmente não ocorre nas amostras incubadas nos respirômetros.

À exceção do respirômetro "0-A", todos os demais apresentaram, ao final do período de incubação, um teor de umidade da amostra maior do que o inicial (**Tab. 6.1.4**). Isso talvez possa ser explicado pelo fato de que a água é uma das substâncias resultantes do processo de biodegradação da matéria orgânica.

Os teores de sólidos voláteis "SV", no solo-controle e nas misturas solo-lodo, para as amostras incubadas nos respirômetros (**Tab. 6.1.4**) apresentaram também valores finais mais baixos do que os iniciais.

Os teores de carbono "C" do solo-controle e das misturas solo-lodo, obtidos das amostras incubadas nos respirômetros (**Tab. 6.1.4**), também apresentaram valores finais mais baixos do que os iniciais. O teor de matéria orgânica "MO", por ser calculado a partir do teor de carbono, segue as mesmas tendências deste.

4.1.5 - Incubação dos respirômetros na 1ª fase

Na data 0, após a 1ª aplicação de lodo na cuba 15 e de água destilada na cuba 0, aguardou-se um tempo de aproximadamente 24 horas, visando a permitir a drenagem do excesso de líquido, tornando-se possível fazer as coletas de amostras nas cubas 0 e 15, para que parte do material coletado fosse utilizado na incubação dos respirômetros. Na 2ª aplicação de lodo na cuba 15 (28 dias após a 1ª aplicação), foi possível fazer a coleta de amostra cerca de 6 horas após a aplicação do lodo. Nessa data não foi lançada água nem coletada amostra da cuba 0.

Nessa 1ª fase, cada amostra representativa foi incubada em duplicata (1 respirômetro padrão e 1 alternativo em cada caso). Os respirômetros receberam as seguintes denominações: 0-A e 0-B (solo-controle); 15-A e 15-B (para a mistura solo-lodo da 1ª aplicação); 30-A e 30-B (para a mistura solo-lodo da 2ª aplicação). A numeração dos respirômetros está associada à taxa aproximada e acumulada de lodo no solo. A letra "A" corresponde ao respirômetro padrão, e a letra "B", ao respirômetro alternativo. As amostras foram incubadas imediatamente após a coleta e sem correção do teor de umidade. Pesaram-se 50 g da amostra úmida, para cada respirômetro. Para se conhecer o peso (em bases secas) "P_s", das amostras incubadas, utilizou-se a expressão 4.1:

$$P_s = \frac{P_u}{1 + h/100} \quad (4.1)$$

onde:

P_u = peso da amostra úmida (em gramas)

h = teor de umidade da amostra (em %)

Calculando-se o peso seco das amostras de solo que foram incubadas nos respirômetros 0-A e 0-B, nas quais o teor de umidade era $h = 34,6 \%$, obteve-se $P_s = 37,2 \text{ g}$. Nos respirômetros 15-A e 15-B, cuja mistura solo-lodo apresentava $h = 35,9 \%$, obteve-se $P_s = 36,8 \text{ g}$ e nos respirômetros 30-A e 30-B, com $h = 47,3 \%$, obteve-se $P_s = 33,9 \text{ g}$.

As diferenças nas quantidades (peso em bases secas), causadas por diferentes teores de umidade das amostras incubadas, que ocorreram nesta 1ª fase conduziram a uma mudança de procedimentos para a 2ª fase. Essa mudança teve por objetivo não só permitir a incubação de todos os respirômetros com a mesma quantidade de amostra (50 g em bases secas), mas também exercer controle sobre o teor de umidade de incubação das amostras, mantendo-o na faixa de 70 % da capacidade de campo do solo-controle. Nessa 1ª fase, as amostras incubadas apresentavam teores de umidade acima da capacidade de campo do solo.

4.1.6 - Capacidade de campo "CC" do solo e ponto de murchamento "PM"

Na **Tab. 6.1.5** são apresentados os resultados dos ensaios de laboratório (método da membrana de Richards), realizados na 1ª e 2ª fases e que permitiram a elaboração das curvas ajustadas de retenção de água no solo (**Fig. 6.2.1**). Esses dados possibilitam o conhecimento não só da capacidade de campo, como também o ponto de murchamento das plantas que venham a ser cultivadas nesse solo.

Para o solo em questão, classificado como argilo-arenoso, segundo considerações de **MEDINA (1975)**, obteve-se nessa 1ª fase $CC = 21,5 \%$, utilizando-se a pressão de 0,33 bar. O ponto de murchamento, definido como o teor de umidade remanescente

após aplicação de uma pressão de 15 bares, obteve-se $PM = 15,3 \%$ para o solo-controle nessa 1ª fase.

4.1.7 - Análise dos resultados de GRGC medidos nos respirômetros da 1ª fase

Para permitir comparação da GRGC medida nos respirômetros da 1ª fase e nos da 2ª fase, foi aplicado aos dados obtidos nesta 1ª fase um fator linear de correção, buscando apresentar os resultados nas mesmas bases de unidades, ou seja, em mg de $CO_2/50$ g de solo seco (ver **Tab. 6.1.6**, cujos dados deram origem aos gráficos da **Fig. 6.2.2**). No entanto, apesar de se acreditar que a GRGC seja diretamente proporcional à quantidade de solo colocada em cada respirômetro, deve-se frisar que não há estudos específicos nesse sentido, sendo pertinente sugerir pesquisas sobre o assunto.

Na **Tab. 6.1.7**, cujos dados deram origem aos gráficos das **Fig. 6.2.3 a 6.2.5** são apresentadas as médias aritméticas (de 2 respirômetros), para o solo-controle e também para as misturas solo-lodo da 1ª fase, contemplando a 1ª e 2ª aplicações de lodo no solo da cuba 15.

A **GRGC média efetiva** foi obtida pela diferença entre a média da mistura solo-lodo e a média do solo-controle, conforme expressão 3.17, sendo essa diferença acumulada, ao longo do tempo. Para possibilitar o cálculo da GRGC média efetiva, a cada relançamento de lodo no mesmo solo, torna-se necessário incubar novos respirômetros de controle, com amostras coletadas antes do relançamento. Nessa 1ª fase, quando do 2º lançamento de lodo na cuba 15, houve uma falha, não tendo sido incubados novos respirômetros de controle, o que tornou impossível a obtenção da GRGC média efetiva, para o 2º lançamento. No entanto, para a 2ª fase, essa falha foi corrigida. A GRGC média diária foi obtida dividindo-se a GRGC média acumulada pelo tempo de incubação, conforme expressão 3.16. Da análise dos dados apresentados nas **Tab. 6.1.6 e 6.1.7**, que deram origem aos gráficos das figuras 6.2.2 a 6.2.5, pode-se destacar:

Durante o período de monitoramento dos respirômetros a GRGC ocorreu sempre, tanto no solo-controle, quanto nas misturas solo-lodo, evidenciando que, para esse tipo de resíduo, sempre que existir matéria orgânica disponível no solo, a biodegradação se dá

de forma contínua. Os valores mais altos foram obtidos no início do período de incubação, quando provavelmente estaria sendo consumida a matéria orgânica mais prontamente biodegradável.

Para os respirômetros incubados com amostras coletadas na 1ª fase - 1ª aplicação de lodo (séries 0 e 15), os totais acumulados (em mg de CO_2 /50 g de solo, em bases secas), após um tempo total de 176 dias de monitoramento, foram: para os respirômetros do solo-controle: 0-A = 753,0; 0-B = 899,0 e para as misturas solo-lodo: 15-A = 775,7 e 15-B = 960,4. Para os respirômetros incubados na 1ª fase - 2ª aplicação (série 30), o total acumulado (em mg de CO_2 /50 g de solo em bases secas), nos 149 dias de monitoramento, para os respirômetros da nova mistura solo-lodo foram: 30-A = 668,5 e 30-B = 852,0 (ver **Tab. 6.1.6** e **Fig. 6.2.2**).

Os números demonstram que os respirômetros alternativos (os de sufixo B), apresentaram valores acumulados sempre maiores do que os respirômetros padronizados (os de sufixo A), quando se comparam os de mesma série (0, 15 ou 30). Uma das possíveis razões para tais diferenças pode estar relacionada com o volume interno útil de cada tipo de respirômetro. No respirômetro padrão esse volume é da ordem de 360 ml, enquanto que o respirômetro alternativo tem cerca de 560 ml. Lembrando-se que, apesar das amostras serem aeradas a cada medição, no período entre duas medições consecutivas o respirômetro permanece hermeticamente vedado. É provável que esteja ocorrendo limitação na disponibilidade de oxigênio molecular " O_2 ", no caso do respirômetro padrão, devido ao seu menor volume útil. O que se percebe é que essas diferenças são maiores no caso das amostras solo-lodo (maior percentagem de matéria orgânica sendo degradada) e à medida que os períodos entre uma leitura e outra são ampliados. Sugerem-se pesquisas, utilizando um número adequado de respirômetros, que permitam um estudo estatístico, variando volumes e talvez até as áreas superficiais de solo, nos respirômetros, com a finalidade de verificar a influência desses parâmetros nos resultados.

Utilizando-se a média aritmética da GRGC de cada série de dois respirômetros (em mg de CO_2 / 50 g de solo seco) e interpolando-se na **Tab. 6.1.7** e/ou na **Fig. 6.2.3**, pode-se comparar, para um período de tempo de 149 dias, a GRGC total de cada série: para o solo-

controle (séries 0-A e B) $GRGC_{149} = 781,2$; para a 1ª aplicação na cuba 15 (série 15-A e B): $GRGC_{149} = 829,4$ e para a 2ª aplicação na cuba 15 (série 30-A e B) $GRGC_{149} = 760,2$.

Na **Fig. 6.2.4** (dados na Tab. 6.1.7), são apresentadas as curvas de GRGC médias diárias x tempo. As curvas mostram claramente uma maior GRGC no início do período de incubação, tanto para o solo-controle quanto para as misturas solo-lodo. Notam-se também nítidas diferenças de valores entre os respirômetros que receberam o solo-controle e os que receberam a mistura solo-lodo. Essas diferenças vão diminuindo ao longo do tempo, sendo as curvas praticamente iguais, ao final do período de incubação.

Na **Fig. 6.2.5** (dados na Tab. 6.1.7), é apresentada a curva da GRGC média efetiva acumulada, para a 1ª aplicação de lodo no solo (1ª fase). Percebe-se que o pico da GRGC média efetiva ocorreu aos 17 dias, com um valor de GRGC em torno de 86 mg de $CO_2/50$ g de solo seco. Numa primeira análise, sugere-se que, a partir desses dados, possam ser estabelecidas frequências de reaplicação, em se tratando de lançamento de lodo para recuperação de solos degradados, por exemplo. Em se tratando de aplicação em solos que estão sendo preparados para culturas anuais, esse tempo deveria preceder o plantio, para evitar prejuízo às plantas, em função da competição pelos nutrientes, que ocorre quando a massa biológica e as plantas encontram-se em fase de crescimento.

4.2 - 2ª fase - Coleta definitiva de dados

4.2.1 - Montagem dos protótipos na 2ª fase

Na 2ª fase, foram montados quatro protótipos (cubas de plástico de aproximadamente 200 litros adaptadas - ver **Fig. 3.2 e item 3.3.3**). O mesmo tipo de solo utilizado na 1ª fase foi colocado nas cubas sobre uma camada drenante de areia, bidim e brita e tinha espessura de 15 cm. Na cuba "0" foi colocado um volume de solo de aproximadamente 27 litros (26,7 kg). Na cuba "5", um volume de aproximadamente 38 litros (35,3 kg). Na cuba "10", um volume de aproximadamente 38 litros (35,3 kg). Na cuba "15", um volume de aproximadamente 39 litros (35,7 kg).

4.2.2 - Caracterização do solo utilizado na 2ª fase

As análises de caracterização do solo utilizado, nesta 2ª fase, foram realizadas em 28/02/95, quando da colocação do solo nas cubas, e complementadas em 08/06/95, antes de qualquer lançamento de lodo no solo, com amostras mistas coletadas nas 4 cubas. Os resultados são apresentados na **Tab. 6.1.1**.

Comparando-se alguns resultados da 1ª e 2ª fases, verifica-se que o valor do pH do solo, guardado ao abrigo do tempo para a 2ª fase, manteve-se em 6,8. No entanto, deve-se ressaltar que, durante esse período de armazenamento houve uma diminuição do teor de matéria orgânica do solo, que passou de 8,4 % (1ª medida efetuada no solo-controle utilizado nas cubas da 1ª fase), para um valor de 6,7 % (valor medido no dia da 1ª aplicação de lodo da 2ª fase, após cerca de 240 dias). Isso parece ter influenciado os valores de GRGC do solo-controle entre essas duas fases. Se comparadas as curvas de GRGC acumuladas do solo-controle da 1ª fase (**Tab. 6.1.7 e Fig. 6.2.3**) com as da 2ª fase (**Tab. 6.1.18 e Fig. 6.2.13**), verifica-se que a GRGC média acumulada na 1ª fase foi de 826 mg de CO₂ (em 176 dias), enquanto na 2ª fase foi de 366,7 mg (em 172 dias).

Na **Tab. 6.1.1** são também apresentados os resultados das análises de nutrientes disponíveis no solo-controle da 2ª fase, sendo os seguintes valores: N-NH₄⁺ (4,1 mg/kg); N-NO₃⁻ (29,0 mg/kg); índice de disponibilidade de N-NH₄⁺ (81,2 mg/kg); fósforo (239,0 mg/dm³); potássio (1,5 meq/100 cm³); cálcio (9,9 meq/100 cm³) e magnésio (3,0 meq/100 cm³).

4.2.3 - Aplicações de lodo nas cubas da 2ª fase

Na **Tab. 6.1.2** são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos lodos utilizados, tanto na 1ª fase quanto nas várias aplicações feitas na 2ª fase. Na 1ª aplicação nas cubas 5, 10 e 15 (2ª fase), o lodo foi coletado em 05/06/95, tendo ficado armazenado anaerobiamente (durante 03 dias), à temperatura ambiente. Na 1ª e 2ª reaplicações feitas na cuba 5, foi utilizado o mesmo lodo coletado em 05/06/95, com armazenamento de 24 e 59 dias, respectivamente, nas mesmas condições. Para a 3ª e 4ª

reaplicações na cuba 5 foi coletado novo lodo em 24/08/95 e 21/09/95, aplicados em ambos os casos, após 7 dias de armazenamento. Os tempos de armazenamento tiveram grande influência nos resultados da GRGC efetiva (ver considerações no **item 4.3.7.2.6-f**).

Comparando-se os resultados da análise de 17 elementos presentes nos lodos aplicados (**Tab. 6.1.2**), com os valores limites apresentados na **Tab. 2.2**, verifica-se que 8 deles constam da tabela e todos apresentaram valores abaixo dos limites de restrição à aplicação no solo, sugerindo que esse lodo pode ser aplicado no solo. Na **Tab. 6.1.1** são apresentados os resultados da análise de acumulação de metais, na mistura solo-lodo da cuba 5. Essa amostragem foi feita 141 dias após a 1ª aplicação de lodo e 29 dias após a 4ª e última reaplicação de lodo no solo dessa cuba. A cuba 5 foi escolhida por ter recebido, cumulativamente, a maior taxa de resíduo (25 tds/ha). Comparando-se os resultados da análise de elementos presentes nesse solo, com os valores limites da **Tab. 2.2**, verifica-se que o elemento arsênio foi o único a ultrapassar o valor máximo permitido de acumulação no solo (41 kg/ha). O solo analisado apresentou 42,8 kg/ha (média de duas determinações). Os resultados anteriores mostram que o monitoramento dos limites de acumulação no solo é necessário e que, no caso desta pesquisa, a taxa de aplicação estaria limitada pelo elemento arsênio.

4.2.3.1 - Aplicação de água destilada na cuba 0

Na mesma data da aplicação de lodo, nas cubas "5", "10" e "15" (08/06/95), a cuba "0" recebeu apenas água destilada (20,57 litros), volume correspondente ao maior volume de lodo lançado (cuba 15). Esse volume corresponderia a uma chuva de aproximadamente 114,0 mm, levando-se em conta que a área superficial aproximada da cuba "0" é de 0,18 m². O teor de umidade do solo-controle era de 28,8%, antes da aplicação de água, e de 45,6%, na amostra coletada cerca de 24 horas após a aplicação (**Tab. 6.1.8**). A cuba "0" foi a única que não recebeu a camada de bidim entre a pedra e a areia (**Fig. 3.2**). Quase que imediatamente após o lançamento da água, começou a ocorrer a drenagem (filtrado de cor amarelada).

4.2.3.2 - Aplicações de lodo na cuba 5

Na cuba "5" foram feitas 5 aplicações de lodo. A primeira ocorreu no dia 08/06/95, com taxa de 5 tds/ha. Foi aplicado um volume de 6,86 litros de lodo líquido, com concentração de sólidos totais " CS_L " = 18,96 g/l ; pH 6,4 ; teor de matéria orgânica "MO" de 21,3% e relação SVL/STL (sólidos voláteis/sólidos totais) de 70,2% (Tab. 6.1.2). O volume de lodo lançado corresponde a uma chuva de 26,4 mm, levando-se em conta que a área superficial aproximada dessa cuba é de 0,26 m². O teor de umidade do solo era de 28,8%, antes da aplicação, e de 39,8% na amostra da mistura solo-lodo coletada cerca de 24 horas após a aplicação (Tab. 6.1.8). Nessa 1ª aplicação, o solo absorveu todo o volume líquido aplicado, não tendo ocorrido drenagem (filtrado).

A 1ª reaplicação de lodo na cuba "5", foi feita em 29/06/95 (21 dias após a 1ª aplicação), com taxa de 5 tds/ha, quando foi aplicado um volume de lodo de 6,77 litros, com CS_L = 19,19 g/l , pH= 6,5 e relação SVL/STL de 69,9% (Tab. 6.1.2). O volume de lodo lançado corresponde a uma chuva de 26,0 mm. O teor de umidade do solo era de 36,4% antes da aplicação, e de 44,4% na amostra da mistura solo-lodo coletada cerca de 24 horas após a aplicação (Tab. 6.1.8). Também neste caso não houve drenagem. A 1ª coleta do líquido drenado (filtrado) na cuba "5" só ocorreu em 10/07/95, após uma chuva acumulada de 30,6 mm em 48 horas (Tab. 6.1.10).

A 2ª reaplicação de lodo na cuba "5" foi feita em 03/08/95 (56 dias após a 1ª reaplicação), com taxa de 5 tds/ha, quando foi aplicado um volume de lodo de 6,62 litros, com CS_L = 19,64 g/l , pH 7,0 , teor de MO = 20,7% e relação SVL/STL de 70,9% (Tab. 6.1.2). O volume lançado corresponde a uma chuva de 25,5 mm. O teor de umidade do solo era de 31,3% antes da aplicação, e de 43,9% na amostra coletada cerca de 24 horas após a aplicação (Tab. 6.1.8). Neste caso, houve drenagem do filtrado em pequena quantidade.

Para a 3ª reaplicação de lodo na cuba 5, realizada em 31/08/95 (84 dias após a 1ª aplicação), com taxa de 5 tds/ha, foi coletado um novo lodo, no dia 24/08/95 e que apresentou CS_L = 5,38 g/l , pH 6,6 , teor de MO de 32,6% e relação SVL/STL de 65,7% (Tab. 6.1.2). Foi aplicado um volume de lodo de 24,16 litros, correspondente a uma chuva de 92,9 mm. O teor de umidade do solo era de 26,1% antes da aplicação, e de 41,3% na amostra

da mistura solo-lodo coletada cerca de 24 horas após a aplicação (**Tab. 6.1.8**). Neste caso, houve drenagem do filtrado (de cor amarelada), ainda no mesmo dia da aplicação.

A 4ª e última reaplicação de lodo na cuba "5" foi feita em 28/09/95 (112 dias após a 1ª aplicação), com taxa de 5 tds/ha, quando foi aplicado um volume de lodo líquido de 16,46 litros, com $CS_L = 7,90 \text{ g/l}$, pH 6,9, teor de MO = 33,6% e relação SVL/STL de 75,6% (**Tab. 6.1.2**). O volume lançado corresponde a uma chuva de 63,3 mm. O teor de umidade do solo era de 38,4% antes da aplicação, e de 51,6% na amostra da mistura solo-lodo coletada cerca de 24 horas após a aplicação (**Tab. 6.1.8**). Para esta 4ª reaplicação, foi coletado um novo lodo, no dia 21/09/95. Neste caso, também houve drenagem do filtrado (de cor amarelada), ainda no mesmo dia da aplicação.

4.2.3.3 - Aplicação de lodo na cuba 10

Na cuba "10" foi feita uma única aplicação de lodo, no dia 08/06/95, utilizando-se um volume de 13,72 litros de lodo líquido, com $CS_L = 18,96 \text{ g/l}$, pH 6,4; teor de MO de 21,3% e relação SVL/STL de 70,2% (**Tab. 6.1.2**). O volume de lodo lançado corresponde a uma chuva de 52,8 mm, levando-se em conta que a área superficial aproximada da cuba "10" é de $0,26 \text{ m}^2$. O teor de umidade do solo era de 28,8%, antes da aplicação, e de 48,1% na amostra da mistura solo-lodo coletada cerca de 24 horas após a aplicação (**Tab. 6.1.8**). Nessa cuba, até as 16 h do dia do lançamento não havia se iniciado ainda a drenagem. No entanto, no dia seguinte foi possível coletar amostra do filtrado (de cor amarelada).

4.2.3.4 - Aplicação de lodo na cuba 15

Na cuba "15" também foi feita uma única aplicação de lodo, no dia 08/06/95, utilizando-se um volume de 20,57 litros de lodo líquido, com $CS_L = 18,96 \text{ g/l}$, pH 6,4; teor de MO de 21,3% e relação SVL/STL de 70,2% (**Tab. 6.1.2**). O volume de lodo lançado corresponde a uma chuva de 79,1 mm, levando-se em conta que também essa cuba apresenta uma área superficial de aproximadamente $0,26 \text{ m}^2$. O teor de umidade do solo era de 28,8%, antes da aplicação, e de 66,2% na amostra da mistura solo-lodo, coletada cerca de 24 horas

após a aplicação (**Tab. 6.1.8**). Nessa cuba, até as 16 h do dia do lançamento de lodo, não tinha ocorrido drenagem. No entanto, no dia seguinte foi possível coletar amostra do filtrado (cor amarelo mais forte do que o das cubas 0 e 10).

4.2.4 - 2ª fase - Monitoramento do solo-controle e das misturas solo-lodo (amostras coletadas nas cubas: 0, 5, 10 e 15, ao longo do tempo)

O monitoramento dos valores de pH, teor de umidade, teor de sólidos voláteis, teor de carbono e de matéria orgânica do solo-controle e das misturas solo-lodo, ao longo do tempo, nesta 2ª fase, são apresentados na **Tab. 6.1.8**.

Com exceção do teor de umidade, para os demais parâmetros tentou-se obter correlações com o tempo de monitoramento. No período considerado foram obtidas equações lineares, com índices de correlação “r” bastante variados. Essas equações estão sendo apresentadas mas não têm nenhuma aplicação prática. Assim como na 1ª fase visam apenas a mostrar que há uma tendência de decréscimo dos valores observados, ao longo do tempo. Da análise dos resultados obtidos, podem-se destacar:

4.2.4.1 - pH (em H₂O)

Durante o período de acompanhamento (169 dias), o pH do solo-controle, cujo valor inicial era 6,8 baixou para 4,6. O pH da mistura solo-lodo da CUBA "5" baixou de 6,8 para 6,6 no dia seguinte à 1ª aplicação de lodo. Após 21 dias tinha baixado para 6,2 e aumentou novamente para 6,3 após receber a 1ª reaplicação de lodo. Após 56 dias tinha baixado para 5,3, aumentando novamente para 5,9 após a 2ª reaplicação. Após 84 dias havia baixado para 5,4, aumentando novamente para 5,6 após a 3ª reaplicação. Após 112 dias tinha baixado para 5,2 aumentando novamente para 5,8 após a 4ª e última reaplicação. Ao final dos 169 dias de acompanhamento, apresentava um pH = 3,1.

Com amostra coletada em 18/09/95, ou seja, 102 dias após a 1ª aplicação na cuba “5” e 10 dias antes da 4ª reaplicação, foram realizados ensaios para neutralização do pH do solo, cujos resultados são apresentados na **Tab. 6.1.9**. Observa-se, pelos valores

apresentados nessa tabela, que o valor de pH do solo foi aumentando em função da adição de quantidades crescentes de CaCO_3 , até estabilizar-se, numa faixa de valores de pH de 6,6 a 6,7, para uma faixa de aplicação de CaCO_3 de 50 mg até 1000 mg, adicionados a 10 g de solo, com teor de umidade de 33,1%. Esses valores confirmam as dificuldades, apontadas na revisão bibliográfica, para a neutralização dos solos, com o incremento dos teores de matéria orgânica.

O valor do pH da mistura solo-lodo da cuba "10", subiu de 6,8 para 7,0 no dia seguinte à 1ª aplicação de lodo. Após 169 dias tinha baixado para 3,8. O pH da mistura solo-lodo da cuba "15", subiu de 6,8 para 6,9 no dia seguinte à 1ª aplicação de lodo. Após 169 dias tinha baixado para 3,5.

Com relação ao monitoramento do pH, os resultados obtidos na 2ª fase, confirmam as tendências e observações feitas, quando da análise dos resultados da 1ª fase, ou seja, há uma clara tendência de acidificação do solo, ao longo do tempo, mais acentuada nos solos que receberam lodo. Analisando-se a **Tab. 6.1.2**, verifica-se no entanto que, nos lodos aplicados, o alumínio estava presente numa faixa de 9.347 a 10.007 mg/kg (em bases secas). Isso pode ter influenciado no aumento da acidez das misturas solo-lodo.

4.2.4.2 - Teor de umidade "h"

De modo geral, analisando-se a **Tab. 6.1.8**, os valores de "h" das misturas solo-lodo mantiveram-se mais altos do que no solo-controle, confirmando a evidência, já demonstrada na 1ª fase da pesquisa, de uma maior retenção de água no solo que recebeu lodo. Para a cuba "5" (que recebeu uma taxa acumulada de 25 tds/ha, nas 5 aplicações), essa diferença manteve-se numa faixa de 3,7% a 5,3%, nas duas últimas determinações. Na cuba 10 (que recebeu 10 tds/ha numa única aplicação), nesse mesmo período, a diferença manteve-se numa faixa de 0,9% a 4,3%. Na cuba 15 (que recebeu 15 tds/ha, numa única aplicação), nesse mesmo período, a diferença manteve-se na faixa de 1,4% a 1,8%.

Na **Tab. 6.1.10**, são apresentados os índices pluviométricos diários, do posto situado a 500 m do local onde foram instaladas as cubas, na FEAGRI (Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP), para o período que abrange a 1ª e 2ª fases desta pesquisa.

Comparando-se os teores de umidade, medidos periodicamente ao longo dos 169 dias de monitoramento, com a capacidade de campo do solo-controle original ($C.C = 21,5\%$), verifica-se que, somente após um extenso período seco (cerca de 26 dias sem chuva), e apenas nas cubas 0 e 10 é que os teores de umidade das amostras ficaram abaixo desse valor ($19,6\%$ para a cuba 0 e $20,5\%$ para a cuba 10, nas amostras coletadas no dia 31/08/95 (**Tab. 6.1.8**). Os números confirmam as observações feitas na 1ª fase da pesquisa, ou seja, a capacidade de campo do solo utilizado é na realidade maior do que o número obtido em laboratório, através do ensaio de membrana de Richards.

Com amostras coletadas nas cubas 0, 5, 10 e 15, em 27/10/95 (141 dias após a 1ª aplicação de lodo nas cubas e cerca de 28 dias após a 4ª reaplicação de lodo na cuba 5), foram feitos novos ensaios para determinação da curva de retenção de água no solo-controle e demais misturas solo-lodo (cubas: 0, 5, 10 e 15). Esses dados são apresentados na **Tab. 6.1.5** e possibilitaram a elaboração das curvas ajustadas (de potência) para a retenção de água no solo (**Fig. 6.2.1**). Analisando-se as curvas apresentadas na **Fig. 6.2.1** pode-se perceber que para o solo-controle (cuba 0 - 2ª fase), a capacidade de campo foi de $24,9\%$, ou seja $3,4\%$ maior do que o valor obtido no ensaio realizado na 1ª fase. O valor obtido para o ponto de murchamento foi de $15,4\%$, bastante próximo do valor obtido anteriormente que era de $15,3\%$. A diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murchamento resulta no valor da disponibilidade de água, que para o solo-controle da cuba 0 seria então de $9,5\%$.

Para a cuba 5 (que recebeu 5 lançamentos de lodo, num total acumulado de 25 tds/ha), a capacidade de campo seria de $26,7\%$ e o ponto de murchamento de $15,8\%$, o que daria uma disponibilidade de $10,9\%$.

Para a cuba 10 (que recebeu de uma só vez 10 tds/ha de lodo), a capacidade de campo foi de $26,5\%$ e o ponto de murchamento de $14,6\%$, o que daria uma disponibilidade de $11,9\%$.

Para a cuba 15 (que recebeu de uma só vez 15 tds/ha de lodo), a capacidade de campo foi de $26,4\%$ e o ponto de murchamento de $14,8\%$, o que daria uma disponibilidade de $11,6\%$.

Os números mostram um aumento na capacidade de campo, em alguns casos uma diminuição do ponto de murchamento e conseqüentemente um aumento na disponibilidade de água para os solos que receberam lodo.

4.2.4.3 - Teor de sólidos voláteis "SV"

O "SV" das amostras coletadas na cuba "0" (solo-controle), em 8 determinações, ao longo de 169 dias, apresentou valor médio de 12,7%, com desvio padrão de 0,1% . Fazendo-se a correlação linear de SV (em %), em função do tempo T (em dias), obteve-se $SV = 12,9 - 0,00198 T$, com $r = - 0,26$.

Comparando-se o SV das amostras coletadas antes do lançamento e 1 dia após cada um dos 5 lançamentos feitos na cuba "5", verifica-se um valor sempre maior, após os lançamentos, na faixa de 0,6 a 0,9%, mostrando, em termos percentuais, o significado do lançamento das 130 g de sólidos secos (5 tds/ha), a cada lançamento de lodo no solo dessa cuba.

O SV das amostras coletadas na cuba "10", em 7 determinações, durante 169 dias, apresentou valor médio de 13,6%, com desvio padrão de 0,4% . Da correlação linear com o tempo resultou $SV = 14,2 - 0,0062 T$, com $r = - 0,86$.

O SV das amostras coletadas na cuba "15", em 7 determinações, ao longo do tempo, apresentou valor médio de 13,7%, com desvio padrão de 0,5% . Da correlação linear com o tempo resultou $SV = 14,3 - 0,00716 T$, com $r = - 0,83$.

As equações obtidas confirmam as constatações feitas na 1ª fase, de diminuição desses valores ao longo do tempo.

4.2.4.4 - Teor de carbono "C"

O "C" das amostras coletadas na cuba "0" (solo-controle), em 8 determinações, ao longo de 169 dias, apresentou valor médio de 3,9% e desvio padrão de 0,1% . Da correlação linear com o tempo, resultou $C = 3,9 - 0,0000212 T$, com $r = - 0,01$.

Comparando-se o teor de carbono das amostras coletadas antes e 1 dia após as 5 aplicações feitas na cuba "5", também se verifica, no segundo caso, um valor maior e na faixa de 0,2 a 0,7% . Isso demonstra, em termos percentuais, o significado do lançamento dos 130 g de sólidos secos (5 tds/ha), a cada aplicação de lodo, no solo dessa cuba.

O teor de carbono das amostras coletadas na cuba "10", em 7 determinações, ao longo do tempo, apresentou valor médio de 4,1%, com desvio padrão de 0,1% . Da correlação linear, em função do tempo, resultou $C = 4,2 - 0,00104 T$, com $r = - 0,57$.

O teor de carbono, das amostras coletadas na cuba "15", em 7 determinações, ao longo do tempo, apresentou valor médio de 4,2%, com desvio padrão de 0,1% . Da correlação linear, em função do tempo, resultou $C = 4,2 - 0,0005 T$, com $r = - 0,22$. Esses números também confirmam a tendência, já verificada na 1ª fase, de uma diminuição desses valores, ao longo do tempo.

4.2.4.5 - Teor de matéria orgânica "MO"

O teor de matéria orgânica, calculado a partir das análises de carbono, apresenta as mesmas tendências deste. Para as amostras coletadas na cuba "0" (solo-controle), o teor de matéria orgânica, em 7 determinações, ao longo de 169 dias, apresentou valor médio de 6,7% e desvio padrão de 0,2% . Na cuba "5", comparando-se o teor de matéria orgânica das amostras coletadas antes e 1 dia após as 5 aplicações, também se verifica, no segundo caso, um valor sempre maior e na faixa de 0,5 a 1,4% , demonstrando, em termos percentuais, o significado do lançamento dos 130 g de sólidos secos (5 tds/ha), a cada lançamento de lodo no solo dessa cuba. Na cuba "10" , obteve-se valor médio de 7,1%, com desvio padrão de 0,2%, e na cuba "15" , obteve-se valor médio de 7,1%, com desvio padrão de 0,2% .

4.2.5 - 2ª fase - Monitoramento do solo-controle e das misturas solo-lodo (valores iniciais e finais das amostras incubadas nos respirômetros)

Na **Tab. 6.1.11** são apresentados os resultados das determinações do valor de pH, teor de umidade, teor de sólidos voláteis, teor de carbono e de matéria orgânica das

amostras incubadas nos respirômetros, antes da incubação e ao final desta.

Salvo exceções - caso dos respirômetros 0-C, 15-A, 15-C e 20R3-C, nos quais houve mistura da solução alcalina de KOH com o solo (**ver item 4.2.7.1**), de maneira geral o valor do pH final foi menor do que o inicial, mostrando a mesma tendência já verificada na 1ª fase desta pesquisa.

Com o teor de umidade “h” não se repetiu a mesma tendência da 1ª fase, ou seja, alguns respirômetros apresentaram umidade menor do que a inicial. No entanto, esse parâmetro ficou prejudicado, pois a maioria dos respirômetros apresentavam-se “suados” (com gotículas de água aderentes internamente ao vidro), ao final do período de incubação.

Salvo exceções (caso dos respirômetros: 10R2-B, 15R3-B, 15R3C, 20R3-B e 20R4-B), o teor de sólidos voláteis **SV** final esteve coerentemente abaixo do valor inicial, mantendo a mesma tendência da 1ª fase.

No que se refere ao teor de carbono, 11 respirômetros apresentaram valores finais maiores que os iniciais (incoerência que talvez possa ser atribuída a imperfeições analíticas ou mesmo de amostragem). Os demais 25 respirômetros apresentaram valores finais menores que os iniciais, mantendo-se nestes a mesma tendência da 1ª fase. O teor de matéria orgânica, calculado a partir do teor de carbono, apresenta as mesmas tendências deste.

A determinação do teor de sólidos voláteis “**SV**” para solos não é muito comum. No entanto essa determinação é muito simples e mais fácil que a determinação do teor de matéria orgânica “**MO**”. Basta que, após a determinação do teor de umidade do solo, a amostra seja colocada numa mufla a 550°C, por 1 hora, determinando-se posteriormente o seu peso final (conforme **item 3.4.5**). Tem a vantagem de utilizar uma maior quantidade de amostra (10 g contra 0,8 g) e ser considerada uma técnica “limpa”, por não envolver a utilização de produtos químicos, em especial o dicromato, no qual está presente o elemento cromo, considerado um metal indesejável nos efluentes.

A relação “**MO/SV**” (teor de matéria orgânica/teor de sólidos voláteis) foi calculada a partir de 68 ensaios realizados nesta 2ª fase, com amostras coletadas ao longo do tempo nas 4 cubas, e os valores finais nos respirômetros (**Tab. 6.1.8 e 6.1.11**). A relação **MO/SV** apresentou um valor médio de 0,533, com desvio padrão de 0,026 e variância de 0,001, ficando configurada como uma distribuição normal. A correlação linear obtida:

$MO = 1,93 + 0,3989 SV$, com índice de correlação $r = 0,64$ (apresentada na Fig. 6.2.6), poderia ser utilizada para determinação do teor de carbono a partir de SV, dentro do intervalo de SV considerado (11,6 a 14,7). Sugerem-se pesquisas com outros tipos de solos, com MO e SV situados em outros intervalos de valores, para verificar se há sempre uma boa correspondência entre esses dois parâmetros.

4.2.6 - Incubação dos respirômetros na 2ª fase

Nesta 2ª fase, as amostras destinadas à incubação nos respirômetros foram coletadas diretamente das respectivas cubas (profundidade de 0,15m de solo), no dia seguinte (cerca de 24 horas) após a aplicação do lodo. Nas reaplicações ocorridas na cuba 5, houve também necessidade de se fazer a coleta antes do lançamento (para as amostras dos novos solos-controle). Após homogeneização das amostras, foram imediatamente pesadas as quantidades necessárias para determinação do teor de umidade e de sólidos voláteis. O restante do material foi colocado para secagem ao ar, durante 3 dias. No 3º dia, após determinação da umidade remanescente nas amostras secas ao ar, pesaram-se 50 g da amostra em bases secas, para cada respirômetro, levando-se em conta o teor de umidade remanescente nas amostras secas ao ar. Para se conhecer o peso úmido "Pu" das amostras, utilizou-se a expressão 4.1. Com exceção da mistura solo-lodo coletada na cuba 15, na qual a umidade remanescente após secagem ao ar, durante 3 dias, ainda permaneceu em 36%, a umidade das demais amostras foi corrigida para 21% (70% da capacidade de campo admitida para esse solo). As amostras foram incubadas em triplicata (1 respirômetro padrão e 2 alternativos em cada caso).

O período de acompanhamento foi de 172 dias. Os respirômetros foram mantidos em estufas de DBO a $(28 \pm 2)^\circ\text{C}$, tendo recebido as seguintes denominações: **0-A, 0-B e 0-C**, correspondentes às amostras coletadas na cuba "0" (solo-controle da 1ª aplicação); **5-A, 5-B e 5-C** (para a amostra da mistura solo-lodo, coletada na cuba 5 - após a 1ª aplicação); **10-A, 10-B e 10-C** (para as amostras da mistura solo-lodo da cuba 10 - 1ª e única aplicação); **15-A, 15-B e 15-C** (para as amostras da mistura solo-lodo da cuba 15 - 1ª e única aplicação). Nessa 1ª aplicação de lodo foi incubado um total de 12 respirômetros.

A cada reaplicação de lodo na cuba 5, foram incubados mais 6 respirômetros (3 para o novo solo-controle e 3 para a nova mistura solo-lodo). Para identificação adotou-se a seguinte numeração:

- **5R1-A, 5R1-B e 5R1-C** - solo-controle (para os respirômetros incubados com amostras coletadas antes da 1ª reaplicação de lodo na cuba 5);
- **10R1-A, 10R1-B e 10R1-C** - mistura solo-lodo (amostras coletadas 1 dia após a 1ª reaplicação de lodo na cuba 5).
- **10R2-A, 10R2-B e 10R2-C** - solo-controle (amostras coletadas antes da 2ª reaplicação de lodo na cuba 5);
- **15R2-A, 15R2-B e 15R2-C** - mistura solo-lodo (amostras coletadas 1 dia após a 2ª reaplicação de lodo na cuba 5).
- **15R3-A, 15R3-B e 15R3-C** - solo-controle (amostras coletadas antes da 3ª reaplicação de lodo na cuba 5);
- **20R3-A, 20R3-B e 20R3-C** - mistura solo-lodo (amostras coletadas 1 dia após a 3ª reaplicação de lodo na cuba 5).
- **20R4-A, 20R4-B e 20R4-C** - solo-controle (amostras coletadas antes da 4ª reaplicação de lodo na cuba 5);
- **25R4-A, 25R4-B e 25R4-C** - mistura solo-lodo (amostras coletadas 1 dia após a 4ª reaplicação de lodo na cuba 5).

Utilizou-se o seguinte critério na numeração dos respirômetros: o 1º número corresponde à taxa acumulada de lodo aplicado no solo (em tds/ha); a letra "R" e o número subsequente refletem as reaplicações. A letra "A" corresponde aos respirômetros de Bartha (padrão) e as letras "B" e "C", aos respirômetros alternativos.

4.2.7 - Análise dos resultados de GRGC medidos nos respirômetros da 2ª fase

4.2.7.1 - Ocorrências durante a fase experimental

Faz-se necessário registrar que, durante a fase experimental, nesta 2ª fase, ocorreram acidentes com alguns respirômetros, que afetaram o seu rendimento, a partir da

data da ocorrência. Apesar disso, procedeu-se normalmente as leituras subsequentes nesses respirômetros e os resultados individuais estão sendo apresentados nas tabelas e gráficos correspondentes. Para possibilitar a continuidade da curva de CO_2 acumulado, quando não houve possibilidade de leitura, adotou-se a média dos outros dois respirômetros da série. No entanto, visando a evitar distorções, os valores obtidos, após acidente com o respirômetro, deixaram de ser considerados no cálculo das outras médias (média acumulada, média diária e média efetiva).

A ocorrência mais comum, que pode ter afetado os resultados de alguns respirômetros, foi o seu tombamento, durante o manuseio ou mesmo na incubadeira, com o conseqüente derramamento do hidróxido de potássio (KOH), sobre o solo. A mistura com o KOH altera o pH do solo. Em todas essas ocorrências observou-se uma tendência de aumento significativo da GRGC, após a mistura do solo com o KOH. O tombamento ou a suspeita de tombamento ocorreu com os seguintes respirômetros:

- **15-C** - no dia 21/06/95 (9 dias após a incubação).
- **15-A** - no dia 11/08/95 (60 dias após a incubação).
- **0-C** - no dia 25/09/95 (105 dias após a incubação);
- **20R3-C** - suspeita, a partir do dia 23/10/95 (49 dias após a incubação). Essa suspeita ficou confirmada com a análise do pH do solo ao final do período de incubação (**Tab. 6.1.11**).

Com o respirômetro 15-A, houve outra ocorrência no dia 04/08/95, quando o recipiente auxiliar (que contém o KOH), apresentou uma trinca no fundo. Uma vez que aparentemente não havia ocorrido nenhum choque, suspeita-se de que houve ataque da solução alcalina (KOH) ao vidro, com conseqüente vazamento da solução. Houve uma tentativa de colar externamente com "araldite", que não funcionou, e o frasco respirométrico acabou sendo trocado. Sugere-se que, para usos mais prolongados do frasco respirométrico, ou mesmo em termos de normalização do recipiente, que este seja confeccionado, ou mesmo protegido internamente, com material que não seja atacado pela solução alcalina.

4.2.7.2 - Resultados da respirometria na 2ª fase

Nas **Tab. 6.1.12 a 6.1.17** e **Fig. 6.2.7 a 6.2.12** são apresentados os

resultados e gráficos de GRGC acumulada, de cada respirômetro, incubados quando da 1ª aplicação de lodo no solo e nas reaplicações de lodo na cuba 5. Nas **Tab. 6.1.18 a 6.1.20 e Fig. 6.2.13 a 6.2.18** são apresentados os dados calculados a partir da média aritmética dos 3 respirômetros de cada série e os respectivos gráficos. Analisando-se esses dados, destaca-se:

4.2.7.2.1 - Tab. 6.1.12 e 6.1.13 e Fig. 6.2.7 e 6.2.8 (1ª aplicação de lodo)

Nos respirômetros incubados com o solo-controle (série "0"), até a data do acidente com o respirômetro 0-C (aos 105 dias da data de incubação), os resultados de GRGC acumulada estavam bem próximos: 285,1 mg de CO₂/50 g de solo (seco) para o 0-A, 277,6 mg para o 0-B e 277,0 mg para o 0-C. Após o acidente, o respirômetro 0-C passou a gerar mais CO₂ que os outros dois. Ao final dos 172 dias de incubação, esses respirômetros apresentavam os seguintes resultados: 0-A = 370,4 mg; 0-B = 366,1 mg e 0-C = 432,5 mg.

Nos respirômetros incubados com amostras da cuba "5" referentes à 1ª aplicação de lodo (série 5), ocorreram diferenças entre os valores medidos no respirômetro padrão e nos alternativos, sendo que nos alternativos os valores acumulados foram maiores, mantendo-se a mesma tendência já relatada na 1ª fase. No entanto, os valores observados nos respirômetros alternativos também não estavam muito próximos. Ao final dos 172 dias de incubação obteve-se: no 5-A = 346,0 mg; para o 5-B = 426,5 mg e para o 5-C = 443,7 mg.

Nos respirômetros incubados com amostras da cuba "10" (série 10), também foram verificadas diferenças entre os valores medidos no respirômetro padrão e nos alternativos, sendo que nestes últimos os valores acumulados foram maiores até o 105º dia de incubação. A partir desse dia, o respirômetro padrão "10-A" passou a gerar mais CO₂ do que o 10-B mas mantendo-se abaixo do 10-C. Ao final dos 172 dias de incubação obteve-se: para o 10-A = 629,3 mg; para o 10-B = 609,8 mg e para o 10-C = 679,9 mg.

Os respirômetros incubados com amostras da cuba "15" (série 15) foram prejudicados pelas ocorrências citadas no item 4.2.7.1. O respirômetro 15-C, por exemplo, vinha apresentando o mais baixo rendimento até o 9º dia de incubação (valor de CO₂ acumulado de 138,5 mg contra 163,0 e 144,7 dos respirômetros 15-A e 15-B, respectivamente). Após a mistura com o KOH, começou a apresentar GRGC maior que os

outros dois. O mesmo ocorreu com o respirômetro 15-A, após o 60º dia. Ao final dos 172 dias, as GRGC acumuladas foram as seguintes: 15-A = 589,2 mg; 15-B = 525,5 mg (o único que não tombou) e 15-C = 683,0 mg.

4.2.7.2.2 - Tab. 6.1.14 e Fig. 6.2.9 (1ª reaplicação de lodo na cuba 5)

Nos respirômetros da série 5R1 (solo-controle), houve diferença entre o padrão e os dois alternativos, mantendo-se a tendência de maior geração de CO₂ nos alternativos. As curvas de GRGC acumulada nos 151 dias de incubação mostraram: para o 5R1-A = 299,3 mg; 5R1-B = 338,9 mg e 5R1-C = 366,7 mg. Nos respirômetros da série 10R1 (mistura solo-lodo), a mesma tendência se manteve: 10R1-A = 296,2 mg; 10R1-B = 342,2 mg e 10R1-C = 357,7 mg.

4.2.7.2.3 - Tab. 6.1.15 e Fig. 6.2.10 (2ª reaplicação de lodo na cuba 5)

Nos respirômetros da série 10R2 (solo-controle), também foi mantida a tendência de maior geração de CO₂ nos alternativos. As curvas de GRGC acumulada nos 116 dias de incubação mostraram: para o 10R2-A = 139,4 mg; 10R2-B = 191,4 mg e 10R2-C = 217,8 mg. Nos respirômetros da série 15R2 (mistura solo-lodo), a mesma tendência se manteve: 15R2-A = 129,7 mg; 15R2-B = 210,1 mg e 15R2-C = 189,0 mg.

4.2.7.2.4 - Tab. 6.1.16 e Fig. 6.2.11 (3ª reaplicação de lodo na cuba 5)

Nos respirômetros da série 15R3 (solo-controle), os valores finais dos 3 respirômetros mantiveram-se mais próximos. As curvas de GRGC acumulada nos 88 dias de incubação mostraram: para o 15R3-A = 98,8 mg; 15R3-B = 107,8 mg e 15R3-C = 97,9 mg. Os resultados para os respirômetros da série 20R3 (mistura solo-lodo) foram prejudicados pelo acidente com o 20R3-C, que passou a gerar mais CO₂ que os outros dois (com valores mais próximos). 20R3-A = 202,7 mg; 20R3-B = 205,3 mg e 20R3-C = 222,8 mg. Percebe-se nos respirômetros que representam o 3º relançamento de lodo na cuba 5 uma maior diferença de

geração de CO_2 entre o solo-controle e a mistura solo-lodo. Esse comportamento aparentemente é explicado quando se analisam as características do lodo aplicado. Nas duas reaplicações anteriores, utilizou-se o mesmo lodo da 1ª aplicação (armazenado anaerobiamente à temperatura ambiente por 24 e 59 dias respectivamente). Na 3ª reaplicação, utilizou-se um lodo mais fresco (7 dias apenas de armazenagem nas mesmas condições).

4.2.7.2.5 - Tab. 6.1.17 e Fig. 6.2.12 (4ª reaplicação de lodo na cuba 5)

Nos respirômetros da série 20R4 (solo-controle), não foi mantida a tendência de maior GRGC nos alternativos, ou seja, num dos alternativos houve menor geração do que no padronizado. Os valores acumulados nos 60 dias de incubação mostraram: para o 20R4-A = 112,7 mg; 20R4-B = 104,7 mg e 20R4-C = 123,4 mg. Os resultados obtidos para os respirômetros da série 25R4 (mistura solo-lodo), mostraram uma maior geração no respirômetro padronizado do que nos outros dois alternativos: 25R4-A = 201,7 mg; 25R4-B = 183,1 mg e 25R4-C = 188,6 mg. Percebe-se, também para os respirômetros que representam a 4ª reaplicação de lodo na cuba 5, uma maior diferença de geração de CO_2 entre o solo-controle e a mistura solo-lodo. Esse comportamento já foi analisado no item anterior. O lodo utilizado também era mais fresco (7 dias apenas de armazenagem).

4.2.7.2.6 - Valores médios de GRGC

Nas Tab. 6.1.18 a 6.1.20 e Fig. 6.2.13 a 6.2.18 são apresentadas, para cada série de 3 respirômetros, a GRGC média acumulada, a GRGC média diária e a GRGC média efetiva. Analisando-se esses resultados, destacam-se:

a) Fig. 6.2.13 - GRGC média acumulada (para o solo-controle, 1ª aplicação nas cubas 5, 10 e 15 e 1ª reaplicação na cuba 5)

Observa-se que as curvas correspondentes às séries 0 e 5 apresentam-se mais uniformes (sem sobressaltos), diferindo das outras duas séries (10 e 15). Isso pode sugerir que

o lançamento de lodo a taxas mais baixas (caso da série 5) permite a degradação de maneira mais uniforme, sem grandes alterações na biota responsável por essa degradação.

Esperava-se que os respirômetros da série 10 apresentassem resultados intermediários entre os da série 5 e 15. Isso não ocorreu, ou seja, no início do período de incubação, até o 25º dia, os respirômetros da série 10 apresentavam GRGC média acumulada menor do que as da série 5. Sem nenhuma razão aparente, a GRGC média acumulada foi aumentando, ultrapassando inclusive os da série 15. Apesar das restrições aos resultados dos respirômetros da série 15, conforme relatado no item 4.2.7.1, essa análise pode indicar uma possível inibição no crescimento biológico nos respirômetros da série 15, considerando-se que estes receberam a maior taxa de resíduos de uma única vez.

b) Fig. 6.2.14 - GRGC média acumulada para a 2ª, 3ª e 4ª reaplicações na cuba 5

Com exceção da 2ª reaplicação (lodo armazenado anaerobiamente há mais tempo que os demais), as curvas demonstram bem as diferenças de GRGC, entre as misturas solo-lodo e os respectivos controles.

c) Fig. 6.2.15 - GRGC média diária (para o solo-controle, 1ª aplicação nas cubas 5, 10 e 15 e 1ª reaplicação na cuba 5)

Os picos de GRGC média diária ocorreram sempre no início do período de incubação dos respirômetros, percebendo-se claramente a diferença entre os valores das misturas solo-lodo e dos solos-controle. Com exceção dos respirômetros da série 10, houve uma tendência, já observada na 1ª fase, de uniformização de resultados, no entorno dos valores referentes aos do solo-controle, ao longo do tempo.

d) Fig. 6.2.16 - GRGC médias diárias (2ª, 3ª e 4ª reaplicações na cuba 5)

Os picos de GRGC médias diárias também ocorreram no início do período de incubação nos respirômetros, onde, com exceção do 2º relançamento, percebe-se claramente a

diferença entre as misturas solo-lodo e o solo-controle. Observa-se também a mesma tendência de uniformização de resultados, ao longo do tempo.

e) Fig. 6.2.17 - GRGC média efetiva (para a 1ª aplicação nas cubas 5, 10 e 15)

Essas curvas definem a diferença de GRGC acumulada entre a mistura solo-lodo e o solo-controle; permitem observar o tempo de estabilização relativa do lodo (pico da curva). No caso das amostras da cuba 5 houve um pico em torno do 20º dia, com leve declínio da curva a partir daí.

No caso das amostras representativas da cuba 10, o comportamento foi diferente. Houve uma certa tendência de estabilização no 40º dia, porém a partir do 56º dia a curva apresentou um crescimento que se prolongou até o último dia de acompanhamento (172 dias).

No caso das amostras representativas da cuba 15, houve uma 1ª tendência de estabilização a partir do 20º dia até o 40º dia, um certo crescimento entre o 40º e o 60º dia e a partir daí houve um declínio da curva.

Em termos de tempo de estabilização, o comportamento mais desejável é o da cuba 5 (20 dias), ou seja, aquela que recebeu a menor taxa de lodo, de uma única vez. No entanto a cuba 10 apresentou a maior GRGC acumulada, representativa de uma maior taxa de biodegradação.

f) Fig. 6.2.18 - GRGC média efetiva (para as 5 aplicações efetuadas na cuba 5)

Nessa figura repetiu-se a curva representativa da 1ª aplicação de lodo na cuba 5, para fins de comparação com as outras 4 reaplicações ocorridas no mesmo solo.

Na 1ª aplicação, a estabilização da curva se deu por volta do 20º dia com o valor de pico em torno de 62 mg de CO_2 /50 g de solo. Na 1ª reaplicação (lodo estocado anaerobiamente durante 24 dias), a estabilização também se deu por volta do 20º dia, porém com valor de pico em torno de 33 mg de CO_2 . Na 2ª reaplicação (lodo estocado anaerobiamente por 59 dias), praticamente não houve diferença entre os valores registrados

para a mistura solo-lodo e o solo-controle, não tendo ocorrido pico da curva e com GRGC efetiva em torno de 0 mg. Na 3ª reaplicação (lodo novo estocado por apenas 7 dias), a curva apresentou uma tendência de crescimento, sendo que, durante o período de acompanhamento (cerca de 88 dias), não houve estabilização, e o valor acumulado ficou por volta de 100 mg de CO_2 . Na 4ª reaplicação (também com um novo lodo estocado por apenas 7 dias), a curva apresentou-se um pouco menos acentuada que a 3ª reaplicação, não chegou a apresentar estabilização durante o período de acompanhamento (cerca de 60 dias), e o valor da GRGC acumulada ficou por volta dos 77 mg de CO_2 , mas já com uma certa tendência à estabilização.

5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Como objetivo desta pesquisa propôs-se realizar o acompanhamento de parâmetros relacionados com a biodegradação da matéria orgânica contida num lodo de esgoto municipal, quando lançado num determinado solo, em diferentes taxas de aplicação. A partir da análise dos resultados podem-se fornecer subsídios para um possível aproveitamento desse lodo. O caráter mais importante desta pesquisa foi testar a metodologia proposta, para que esta possa vir a ser utilizada em pesquisas correlatas, com outros tipos de solo e de lodo. As conclusões aqui apresentadas não devem ser encaradas como definitivas, podendo ser consideradas válidas apenas para o solo e lodo estudados, uma vez que há uma grande variedade de tipos de solos e de lodos, que certamente irão apresentar comportamentos diferentes. Portanto, para o tipo de solo e de lodo utilizados neste trabalho experimental e em função dos resultados obtidos, pode-se concluir:

Os protótipos (cubas para lançamento de lodo líquido ao solo - **Fig. 3.2**) propostos nesta pesquisa, funcionaram adequadamente, podendo ser utilizados em outras pesquisas correlatas.

Os respirômetros padronizados (**Fig. 3.3**), quando utilizados para resíduos contendo alta carga orgânica (caso do lodo), deveriam ter seu volume interno útil aumentado (**ver item 4.1.7**), uma vez que, mesmo tendo sido mantida a reaeração no microcosmo interno aos respirômetros, a cada leitura da GRGC, conforme previsto (**item 3.7.3.5.e**), aparentemente em algumas situações estaria havendo limitação na quantidade de oxigênio necessária à biodegradação. Sugere-se, por exemplo, na montagem do respirômetro padronizado, a utilização de um erlenmeyer de 500 ml, ao invés do de 250 ml, para o compartimento que irá

conter o solo. Sugere-se ainda que sejam realizadas pesquisas para verificar a influência do volume interno dos respirômetros nos resultados. Outra pesquisa que pode ser sugerida é a verificação da correspondência entre a quantidade de solo utilizada no respirômetro e os resultados de CO₂ gerados.

Os respirômetros alternativos (Fig. 3.4) funcionaram adequadamente, necessitando apenas de um maior cuidado na manipulação, para evitar derramamento da solução alcalina (KOH) no solo. A mistura com o KOH aumenta o valor de pH do solo, gerando significativamente mais CO₂ (ver item 4.2.7.1). Esse aumento na geração de CO₂ é explicado pela elevação do valor de pH do solo para valores mais propícios ao crescimento dos microrganismos, responsáveis pela degradação da matéria orgânica. Deve-se lembrar que as bactérias atuam numa faixa de pH 5,5 a 8,5 mas com maior atividade próximo do pH neutro. Na faixa de pH < 5,5 há predominância dos actinomicetos e fungos (cuja velocidade de degradação da matéria orgânica é mais baixa do que a das bactérias).

O indicador **vermelho de metila**, cuja utilização é prevista no projeto de norma ABNT (1993), na padronização do KOH e do HCl (ver itens 3.7.2.2 e 3.7.2.4), apresenta uma velocidade de viragem muito lenta e de difícil visualização. Essas padronizações tiveram que ser feitas com a utilização de pHmetro. O ponto de viragem foi considerado como sendo o pico da curva: $\Delta \text{pH} / \Delta \text{volume de reagente}$ (ordenadas) x volume de reagente (abscissas). Sugere-se utilizar esse método eletrométrico ou mesmo que seja estudado um outro tipo de indicador de mais fácil visualização, nessas padronizações.

Durante o período de monitoramento das cubas, tanto na 1ª quanto na 2ª fase, notou-se uma tendência de diminuição do pH dos solos (acidificação), ao longo do tempo. Isso ocorreu tanto para o solo-controle quanto para as misturas solo-lodo, mas foi maior nos solos que receberam lodo. No caso extremo, o da cuba 5 - 2ª fase (que recebeu 5 lançamentos de lodo, num total de 25 tds/ha), o valor do pH inicial que era 6,8, ao final dos 169 dias de monitoramento havia baixado para 3,1. Esse decaimento do pH, aparentemente excessivo, poderia estar relacionado com a presença de alumínio no lodo (ver item 4.2.4.1). Para solos já

de natureza ácida, sugerem-se pesquisas, utilizando-se lodos desidratados, pré-condicionados com cal, cujos valores de pH resultam bastante altos (em torno de 12).

Os solos que receberam lodo tiveram aumentada sua capacidade de retenção de água (**ver itens 4.1.3.2 e 4.2.4.2**). Na 2ª fase, para as amostras coletadas nas cubas 5, 10 e 15, comparadas com as da cuba "0" (solo-controle), verificou-se uma diferença na capacidade de campo CC, na faixa de 1,5 a 1,8% (**ver Tab. 6.1.5 e Fig. 6.2.1**).

O teor de sólidos voláteis SV do solo não é um parâmetro muito comumente utilizado em estudos dessa natureza. No entanto, é uma técnica limpa (pois não são utilizados produtos químicos), de mais rápida e fácil determinação que o teor de matéria orgânica MO. Esses dois parâmetros podem ser correlacionados (**ver item 4.2.5**). Sugerem-se pesquisas com outros tipos de solos para verificar se há sempre uma boa correlação entre SV e MO.

A partir dos testes realizados, pode-se afirmar que o ensaio de respirometria apresenta uma boa resposta, podendo ser uma excelente ferramenta para acompanhar a degradação de resíduos contendo matéria orgânica, quando estes são lançados no solo.

Os resultados dos ensaios respirométricos são influenciados principalmente: pelo teor de matéria orgânica biodegradável contida no resíduo aplicado e pelo pH do solo ou da mistura solo-resíduo, em termos de **GRGC efetiva**. Em se tratando de lodo de esgoto municipal, verificou-se que também o tempo de estocagem anaeróbia do lodo, após coleta, exerce grande influência nos resultados da **GRGC efetiva** (**ver item 4.2.7.2.6-f**).

A escolha da melhor taxa de aplicação de lodo no solo, levando-se em conta apenas os testes respirométricos, merece algumas considerações. Se o critério de escolha for o menor tempo de degradação, os resultados obtidos na 2ª fase desta pesquisa apontam para a taxa de 5 tds/ha (cujo tempo ficou em torno de 20 dias). No entanto esse tempo de 20 dias às vezes não se repete, como ocorreu na 3ª e 4ª reaplicações de lodo na cuba 5. Se o critério for a não contaminação do aquífero freático com o percolado, também a taxa de 5 tds/ha seria mais propícia, uma vez que o volume líquido lançado seria sempre menor que as outras taxas, para qualquer concentração de sólidos no lodo. O critério econômico também aponta para essa taxa,

uma vez que os volumes de transporte seriam menores. No entanto, sob o aspecto de reator biológico, a cuba “10”, que recebeu a taxa de 10 tds/ha, parece apresentar a melhor eficiência, uma vez que, tendo gerado mais CO₂ que as outras duas taxas, teria melhor degradado a matéria orgânica presente. Deve-se ressaltar que o comportamento dos respirômetros representativos da taxa de 10 tds/ha foram considerados anômalos (**ver item 4.2.7.2.6-a**) e os resultados da taxa de 15 tds/ha foram prejudicados com os acidentes ocorridos com os respirômetros (**ver item 4.2.7.1**). No entanto, a escolha da melhor taxa de aplicação não deve se basear apenas nos resultados da respirometria. Por essa razão, nos lodos utilizados na 2ª fase da presente pesquisa (coletados em 3 diferentes datas), foram feitas análises para 17 elementos potencialmente tóxicos (**ver Tab. 6.1.2**). Desse total, 8 elementos constam da **Tab. 2.2**, que nos EUA fixa limites desses elementos no lodo, incluindo limites de acumulação no solo (**USEPA, 1993**). O lodo apresentou valores abaixo dos limites da **Tab. 2.2**, concluindo-se a princípio que este poderia ser aproveitado na melhoria de solos.

Por outro lado, a análise de acumulação de metais feita no solo da CUBA 5, que recebeu a taxa acumulada de 25 tds/ha (**ver Tab. 6.1.1**), ilustra bem a necessidade de monitoramento do solo que recebe lodo, incluindo o aquífero subterrâneo. No caso do solo e lodo utilizados nesta pesquisa, a princípio, não seria recomendável a aplicação de uma taxa superior a 20 tds/ha de lodo no solo, uma vez que, para a taxa acumulada de 25 tds/ha, o elemento arsênio ultrapassou os limites de acumulação no solo, tendo apresentado um valor médio (em duas determinações) de 42,9 kg/ha, sendo que o valor limite é de 41 kg/ha. Os outros metais analisados ficaram bastante abaixo dos limites.

Finalizando, fica a certeza de que a utilização do lodo, principalmente em solos agrícolas, desde que conduzida com a necessária seriedade em relação aos inconvenientes apontados, é não somente uma forma ambientalmente menos traumática de **“se livrar desse resíduo”** mas também uma necessidade. Num país como o nosso, de enormes extensões de terras agrícolas, em grande parte já devastadas pela má utilização, muitas áreas poderiam ir sendo recuperadas com aplicação de lodo, voltando a se tornar produtivas.

6 - ANEXOS

6.1 - TABELAS

São apresentadas neste item, as **Tab. 6.1.1 a 6.1.20**, contendo os dados obtidos na fase experimental da presente pesquisa.

Tab. 6.1.1 - 1ª e 2ª FASES - CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

DISCRIMINAÇÃO	1ª FASE	2ª FASE	
	SOLO CONTROLE	SOLO CONTROLE	SOLO DA CUBA 5
- Data de coleta do solo para análises (1)	10.10.94	08.06.95	27.10.95
- Massa específica aparente úmida (solo solto em kg/m ³)	959,0	940,0	-
- Massa específica aparente seca (solo solto em kg/m ³)	835,0	885,0	-
- Massa específica dos grãos (kg/m ³)	2.565,0	-	-
- Teor de umidade (%)	14,9	28,8	31,9
- Capacidade de campo (em % - ver subitem 4.1.6)	21,5	-	27,8
- Ponto de murchamento (em % - ver subitem 4.1.6)	15,3	-	15,9
- Teor de sólidos voláteis (%)	12,4	12,7	14,6
- Teor de carbono (%)	4,9	3,9	4,4
- Teor de matéria orgânica (%)	8,4	6,7	7,5
- pH (em H ₂ O)	6,8	6,8	4,3
- teor de argila (%)	35,0	-	-
- teor de silte (%)	15,0	-	-
- teor de areia (%)	50,0	-	-
- classificação (USDA)	SOLO ARGILO-ARENOSO		-
- Nitrogênio (N-NH ₄ ⁺ em mg/kg) (2 e 3)	-	4,1	-
- Nitrogênio (N-NO ₃ ⁻ em mg/kg) (2 e 3)	-	29,0	-
- Índice de disponibilidade (N-NH ₄ ⁺ em mg/kg) (2 e 3)	-	81,2	-
- Fósforo (P - em mg/dm ³)	-	239,0	-
- Potássio (K - em meq/100 cm ³)	-	1,5	-
- Cálcio (Ca - em meq/100 cm ³)	-	9,9	-
- Magnésio (Mg - em meq/100 cm ³)	-	3,0	-
- Análise de metais: (4 e 5)			
. arsênio "As" (kg/ha)	-	-	42,8
. cádmio "Cd" (kg/ha)	-	-	< 0,5
. chumbo "Pb" (kg/ha)	-	-	98,9
. cobre "Cu" (kg/ha)	-	-	53,1
. cromo "Cr" (kg/ha)	-	-	43,0
. molibdênio "Mo" (kg/ha)	-	-	5,2
. níquel "Ni" (kg/ha)	-	-	< 0,7
. zinco "Zn" (kg/ha)	-	-	207,8
. alumínio "Al" (kg/ha)	-	-	42.473,3
. bário "Ba" (kg/ha)	-	-	< 1,4
. cálcio "Ca" (kg/ha)	-	-	2.378,8
. cobalto "Co" (kg/ha)	-	-	< 0,7
. ferro "Fe" (kg/ha)	-	-	40.039,0
. magnésio "Mg" (kg/ha)	-	-	573,3
. manganês "Mn" (kg/ha)	-	-	101,5
. titânio "Ti" (kg/ha)	-	-	176,7
. vanádio "V" (kg/ha)	-	-	89,9
OBSERVAÇÕES:			
1 - As determinações das massas específicas aparentes (úmida e seca) da 2ª fase, foram feitas em 08.02.95.			
2 - As análises de nutrientes no solo foram realizadas no IAC (Instituto Agronômico de Campinas).			
3 - Os valores de nitrogênio do solo-controle foram obtidos na amostra coletada em 29.06.95.			
4 - As análises de metais foram feitas no Instituto de Química da USP - São Paulo			
5 - Os valores obtidos para metais em mg/kg foram multiplicados pelo fator 1,29 para estimativa em kg/ha.			

Tab. 6.1.5 - 1ª e 2ª FASES - RETENÇÃO DE AGUA NO SOLO (ensaio: membrana de Richards)

PRESSÃO APLICADA (bar)	TEOR DE UMIDADE (% DE AGUA RETIDA NO SOLO)				
	1ª FASE SOLO-CONTR. CUBA 0	2ª FASE: SOLO COLETADO NAS CUBAS (em 27.10.95)			
		CUBA 0	CUBA 5	CUBA 10	CUBA 15
0,10	27,0	27,50	32,83	34,42	30,46
0,10	-	29,26	31,38	32,20	31,36
0,33	21,5	24,83	26,68	26,65	27,70
0,33	-	26,20	28,86	28,61	26,83
0,50	19,8	25,41	25,25	25,79	24,93
0,50	-	25,24	24,45	26,02	25,47
0,80	18,4	23,04	25,05	22,40	23,32
0,80	-	22,82	24,45	23,78	23,89
1,00	18,0	19,45	21,18	19,35	22,02
1,00	-	21,73	20,72	18,67	21,14
3,00	16,8	18,05	19,22	18,34	17,96
3,00	-	17,44	18,46	18,04	18,31
5,00	16,4	16,86	18,29	16,67	17,37
5,00	-	16,20	17,94	17,06	16,42
10,00	15,8	17,80	17,42	16,88	16,82
10,00	-	17,66	18,42	16,54	17,16
15,00	15,3	14,76	14,97	14,42	14,74
15,00	-	16,13	16,88	15,87	14,02
OBSERVAÇÃO: Ver Fig. 6.2.1 - curvas ajustadas a partir dos dados desta tabela.					

Tab. 6.1.6 - 1ª FASE - ACOMPANHAMENTO DA GRGC NOS RESPIRÔMETROS: 0-A, 0-B, 16-A, 16-B, 30-A e 30-B.

TEMPO DE INCUBAÇÃO DAS AMOSTRAS (dias)			VOL. HCI GASTO NO BRANCO	CUBA "0" - SOLO-CONTROLE						CUBA "16" MISTURA SOLO-LODO (taxa: 16,6 tds/ha)						CUBA "30" MISTURA SOLO-LODO (reaplio. taxa: 13,5 tds/ha)					
				AMOSTRA 0-A RESPIRÔM. PADRÃO			AMOSTRA 0-B RESPIRÔM. ALTERN.			AMOSTRA 16-A RESPIRÔM. PADRÃO			AMOSTRA 16-B RESPIRÔM. ALTERN.			AMOSTRA 30-A RESPIRÔM. PADRÃO			AMOSTRA 30-B RESPIRÔM. ALTERN.		
				VOL. HCI	CO2 CALC.	CO2 ACUM.	VOL. HCI	CO2 CALC.	CO2 ACUM.	VOL. HCI	CO2 CALC.	CO2 ACUM.	VOL. HCI	CO2 CALC.	CO2 ACUM.	VOL. HCI	CO2 CALC.	CO2 ACUM.	VOL. HCI	CO2 CALC.	CO2 ACUM.
DATA DA MEDIÇÃO	DIAS ACUM. NA 1ª APLIC.	DIAS ACUM. REAPLI- CAÇÃO	ml	ml	mg/50g	mg/50g	ml	mg/50g	mg/50g	ml	mg/50g	mg/50g	ml	mg/50g	mg/50g	ml	mg/50g	mg/50g	ml	mg/50g	mg/50g
11/10/94	0				0	0		0	0		0	0		0	0						
12/10/94	1		15,1	9,6	19,6	19,6	7,7	26,3	26,3	6,0	32,6	32,6	0,0	64,2	64,2						
14/10/94	3		14,7	5,6	32,3	61,9	5,6	32,7	69,0	2,5	43,8	76,4	1,0	49,2	103,3						
17/10/94	6		15,3	0,6	52,6	104,6	1,0	50,8	109,8	-3,3	66,7	143,2	-3,3	66,7	170,1						
18/10/94	7		15,2	7,9	25,9	130,4	8,0	25,6	135,4	3,8	40,9	184,1	1,5	49,2	219,2						
21/10/94	10		16,1	8,0	28,8	159,2	8,0	28,8	164,2	5,6	37,7	221,7	3,5	45,2	264,4						
25/10/94	14		15,9	4,4	40,9	200,1	2,5	47,6	211,8	3,7	43,8	265,5	1,7	50,9	315,4						
28/10/94	17		16,1	6,0	36,9	236,9	5,7	37,0	248,7	6,8	33,4	298,9	4,2	42,7	358,1						
31/10/94	20		16,1	7,2	31,6	267,6	5,6	37,7	286,4	7,8	29,8	328,6	6,4	38,4	396,4						
04/11/94	24		16,1	5,8	36,6	304,2	4,6	40,9	327,3	7,3	31,6	360,2	4,3	42,3	438,8						
07/11/94	27	0	16,1	8,3	27,7	331,9	7,0	32,3	359,6	9,4	24,0	384,2	6,6	34,1	472,9		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11/11/94	31	4	16,1	7,6	30,6	362,6	6,2	35,2	394,8	8,8	26,2	410,4	6,2	35,5	508,4	1,5	56,8	56,8	1,4	57,2	57,2
14/11/94	34	7	16,1	9,6	23,6	385,9	8,6	27,0	421,8	10,2	21,2	431,6	8,6	26,9	536,3	2,3	53,7	110,4	2,5	52,9	110,1
17/11/94	37	10	16,8	10,2	19,9	405,8	9,0	24,2	446,0	10,7	18,3	449,9	9,4	23,0	558,3	3,7	47,1	157,5	2,9	50,2	160,2
22/11/94	42	15	16,2	8,6	27,4	433,2	7,2	32,0	477,9	9,9	22,6	472,5	7,3	31,9	590,2	1,5	57,2	214,7	0,3	61,8	222,0
25/11/94	45	18	15,9	10,9	17,8	450,9	10,2	20,3	498,2	12,3	12,9	485,4	10,1	20,8	611,0	7,4	33,1	247,7	4,4	44,7	266,8
29/11/94	49	22	15,8	10,2	19,9	470,8	9,1	23,8	522,0	11,5	15,4	500,9	9,2	23,7	634,7	6,3	36,9	284,7	3,8	46,7	313,4
06/12/94	56	29	16,1	8,7	26,3	497,1	6,8	33,0	555,0	8,5	27,3	528,1	7,3	31,6	666,2	3,9	47,4	332,1	0,7	59,9	373,3
09/12/94	59	32	16,5	11,8	16,7	513,8	11,1	19,2	574,2	11,9	16,5	544,6	11,5	17,9	684,2	10,1	24,9	367,0	6,2	40,1	413,4
15/12/94	65	38	16,0	9,6	22,7	536,6	8,4	27,0	601,2	10,5	19,7	564,4	9,0	25,1	709,3	8,4	29,6	386,5	4,0	46,7	460,0
21/12/94	71	44	16,0	10,0	21,3	557,9	8,8	25,6	626,8	9,8	22,2	586,6	9,5	23,3	732,6	9,0	27,2	413,8	5,1	42,4	502,4
29/12/94	79	52	16,5	9,6	24,9	582,8	8,1	29,8	656,7	9,5	25,1	611,7	9,2	26,2	758,8	8,3	31,9	445,6	4,5	46,7	549,1
09/01/95	90	63	16,5	9,4	25,2	608,0	6,1	37,0	693,6	9,6	24,8	636,5	7,6	31,9	790,7	7,7	34,2	479,9	3,2	61,7	600,8
19/01/95	100	73	16,8	10,2	22,7	630,7	7,4	32,7	726,3	9,8	24,4	660,9	9,3	26,2	816,9	8,9	29,9	509,8	5,4	43,6	644,4
02/02/95	114	87	16,9	8,4	30,2	660,9	4,4	44,4	770,7	7,6	33,4	694,2	7,0	35,5	852,5	3,6	61,7	561,5	2,9	54,4	698,8
20/02/95	132	106	16,8	9,3	26,7	687,6	5,9	38,7	809,5	9,8	25,1	719,3	7,9	31,9	884,4	9,5	28,4	589,9	4,5	47,8	746,6
06/03/95	146	119	16,9	10,4	23,1	710,7	7,8	32,3	841,8	11,2	20,5	739,8	9,6	26,2	910,6	10,5	24,9	614,8	7,1	38,1	784,7
22/03/95	162	136	16,8	10,6	22,0	732,7	8,1	30,9	872,7	11,5	19,0	768,8	9,6	25,8	936,4	9,8	27,2	642,0	7,3	36,9	821,7
05/04/95	176	149	16,8	11,1	20,3	753,0	9,4	26,3	899,0	12,1	16,9	775,7	10,1	24,0	960,4	10,0	26,4	668,5	9,0	30,3	852,0

Tab. 6.1.7 - 1ª FASE - GRGC: MÉDIA, MÉDIA ACUMULADA, MÉDIA DIÁRIA e MÉDIA EFETIVA

TEMPO DE INCUBAÇÃO DAS AMOSTRAS (dias)			VALORES MÉDIOS DE 2 RESPIRÔMETROS										
			1ª e 2ª APLICAÇÕES DE LODO NO SOLO (taxas: de 16,5 e 13,5 tde/ha)										
			NO SOLO-CONTROLE RESPIRÔMETROS: 0-A e 0-B			NA MISTURA SOLO-LODO (1ª APLICAÇÃO.) RESPIRÔMETROS 15-A e 15-B				NA MISTURA SOLO-LODO (2ª APLICAÇÃO) RESPIRÔMETROS 30-A e 30-B			
DATA DA MEDICAÇÃO	DIAS ACUM. NA 1ª APLICAÇÃO	DIAS ACUM. REAPLI- CAÇÃO	MÉDIA (mg/50g)	MÉDIA ACUM. (mg/50g)	MÉDIA DIÁRIA (mg/50g)	MÉDIA (mg/50g)	MÉDIA ACUM. (mg/50g)	MÉDIA DIÁRIA (mg/50g)	MÉDIA EFETIVA (mg/50g)	MÉDIA (mg/50g)	MÉDIA ACUM. (mg/50g)	MÉDIA DIÁRIA (mg/50g)	MÉDIA EFETIVA (mg/50g)
11/10/94	0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
12/10/94	1		22,9	22,9	22,9	43,4	43,4	43,4	20,5				
14/10/94	3		32,5	55,4	18,5	46,5	89,9	30,0	34,4				
17/10/94	6		51,7	107,1	17,9	66,7	156,6	26,1	49,5				
18/10/94	7		25,8	132,9	19,0	45,0	201,6	28,8	68,7				
21/10/94	10		28,8	161,7	16,2	41,4	243,1	24,3	81,4				
26/10/94	14		44,2	205,9	14,7	47,4	290,4	20,7	84,5				
28/10/94	17		36,4	242,3	14,3	38,0	328,5	19,3	86,1				
31/10/94	20		34,6	277,0	13,8	34,1	362,5	18,1	85,6				
04/11/94	24		38,7	315,7	13,2	37,0	399,5	16,6	83,8				
07/11/94	27	0	30,0	345,7	12,8	29,1	428,6	15,9	82,8	0,0	0,0	0,0	(*)
11/11/94	31	4	32,9	378,6	12,2	30,9	459,4	14,8	80,8	57,0	57,0	14,2	
14/11/94	34	7	25,2	403,8	11,9	24,0	483,5	14,2	79,6	53,3	110,2	15,7	
17/11/94	37	10	22,0	425,9	11,5	20,6	504,1	13,6	78,2	48,6	158,9	15,9	
22/11/94	42	15	29,7	455,6	10,8	27,3	531,3	12,7	75,8	59,5	218,4	14,6	
26/11/94	46	18	19,0	474,6	10,5	16,9	548,2	12,2	73,6	38,9	257,2	14,3	
29/11/94	49	22	21,9	496,4	10,1	19,6	567,8	11,6	71,3	41,8	299,0	13,6	
06/12/94	56	29	29,7	526,1	9,4	29,4	597,2	10,7	71,1	63,7	362,7	12,2	
09/12/94	59	32	17,9	544,0	9,2	17,2	614,4	10,4	70,4	32,5	385,2	12,0	
16/12/94	65	38	24,9	568,9	8,8	22,4	636,8	9,8	67,9	38,1	423,3	11,1	
21/12/94	71	44	23,5	592,4	8,3	22,8	659,6	9,3	67,3	34,8	458,1	10,4	
29/12/94	79	52	27,4	619,7	7,8	25,7	685,3	8,7	65,5	39,3	497,4	9,6	
09/01/95	90	63	31,1	650,8	7,2	28,3	713,6	7,9	62,8	43,0	540,3	8,6	
19/01/95	100	73	27,7	678,5	6,8	25,3	738,9	7,4	60,4	36,7	577,1	7,9	
02/02/95	114	87	37,3	715,8	6,3	34,4	773,3	6,8	57,5	53,1	630,2	7,2	
20/02/95	132	105	32,7	748,5	6,7	28,5	801,9	6,1	53,3	38,1	668,3	6,4	
06/03/95	146	119	27,7	776,2	6,3	23,3	825,2	6,7	48,9	31,5	699,8	5,9	
22/03/95	162	135	26,5	802,7	5,0	22,4	847,6	5,2	44,9	32,1	731,9	5,4	
06/04/95	176	149	23,3	826,0	4,7	20,5	868,1	4,9	42,1	28,4	760,2	5,1	

* PARA A 2ª APLICAÇÃO DE LODO NA CURA 15, NÃO FOI POSSÍVEL OBTER A GRGC MÉDIA EFETIVA, POR NÃO TER SIDO INCUBADO NOVO RESPIRÔMETRO CONTROLE

Tab. 6.1.10 - (ÍNDICES PLUVIOMÉTRICOS (mm/dia) - POSTO DA FEAGRI - UNICAMP
PERÍODO: OUTUBRO DE 1994 a NOVEMBRO DE 1995

DIA	1 9 9 4			1 9 9 5										
	OUT	NOV.	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV
1	6,4	0,0	0,0	6,2	0,8	0,0	37,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	2,8	1,8	20,2	40,8	0,0	13,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6
3	0,0	0,0	4,0	14,4	18,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,8
4	0,0	0,0	0,0	66,0	9,6	30,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	20,0	1,6	7,4	48,4	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	9,8
6	0,0	1,6	5,2	3,2	26,2	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0
7	0,0	0,0	1,2	0,0	31,4	0,0	0,0	10,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	14,6	0,4	0,0	16,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	14,2	38,4	0,4	0,0	0,0	0,0	10,2	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	1,1	0,0	1,4	25,6	15,4	1,8	1,4	0,0	30,4	0,0	0,0	0,0	0,2
11	0,0	0,0	0,0	13,2	0,0	0,4	3,4	19,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2
12	0,0	0,0	15,6	7,8	16,0	0,0	10,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
13	0,0	6,4	0,0	0,8	20,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0
14	0,0	27,4	0,0	0,0	22,0	22,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,4	0,0
15	0,0	7,6	0,0	16,8	15,5	7,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	12,4	16,0
16	0,0	3,3	28,7	0,0	16,6	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23,8	5,8
17	0,0	0,0	0,0	2,8	3,1	0,0	0,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	20,2	0,0
18	0,0	4,8	67,6	0,0	2,4	0,0	0,0	0,0	8,4	0,0	0,0	5,2	22,4	0,0
19	0,0	9,4	22,7	20,6	8,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,6	0,2	0,0
20	0,0	0,0	0,0	3,6	32,8	1,4	1,8	0,0	0,0	0,2	0,0	9,4	8,0	0,0
21	0,6	0,0	0,0	0,0	14,5	0,0	32,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	6,2	0,0
22	1,4	0,0	47,2	24,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,6	0,0	0,0	2,2	0,0
23	3,0	0,0	65,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0,4	0,0	2,4	0,0	0,0	21,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	21,4
25	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,8	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	8,0	0,0	-
26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,8	0,0	0,0	0,0	0,0	-
27	37,4	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27,4	0,0	-
28	4,6	38,4	0,6	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	-
29	8,0	18,8	0,6	20,2	XX	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
30	0,2	11,0	0,0	7,8	XX	38,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,0	-
31	0,2	XX	0,0	11,8	XX	35,2	XX	0,0	XX	0,0	0,0	XX	14,2	-
TOTAIS	73,2	151,6	255,8	265,6	406,9	193,8	101,2	51,4	19,6	46,4	0,4	76,2	160,0	-
OBSERVAÇÕES:														
1 - A 1ª FASE DOS TRABALHOS DESENVOLVEU-SE DE 10/10/94 a 05/04/95														
2 - A 2ª FASE DOS TRABALHOS DESENVOLVEU-SE DE 08/06/95 a 24/11/95														

Fonte: CEPAGRI - UNICAMP

Tab. 6.1.11 - 2ª FASE - VALORES INICIAIS E FINAIS DE pH, TEOR DE UMIDADE, TEOR DE SÓLIDOS VOLÁTEIS, TEOR DE CARBONO E DE MATÉRIA ORGÂNICA, NO SOLO E NAS MISTURAS SOLO-LODO, DAS AMOSTRAS INCUBADAS NOS RESPIRÔMETROS

RESPIRÔMETROS		pH (H ₂ O)		TEOR DE UMIDADE (%)		TEOR DE SÓ- LIDOS VOLÁ TEIS (%)		TEOR DE CARBONO (%)		TEOR DE MATÉRIA OR- GÂNICA (%)	
		INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
solo-controle	0-A	6,8	6,5	21,0	21,6	12,7	11,9	3,9	3,8	6,7	6,6
	0-B	6,8	6,4	21,0	17,3	12,7	11,6	3,9	3,5	6,7	6,1
	0-C (3)	6,8	7,7	21,0	36,9	12,7	11,6	3,9	3,4	6,7	6,0
solo+lodo 1ª aplic. cuba 5 taxa: 5 tds/ha	5-A	6,6	5,4	21,0	24,8	13,2	12,9	4,0	4,0	6,9	6,9
	5-B	6,6	5,5	21,0	19,5	13,2	12,4	4,0	4,1	6,9	7,1
	5-C	6,6	5,3	21,0	25,5	13,2	12,6	4,0	4,0	6,9	6,9
solo+lodo APLIC. ÚNICA taxa: 10 tds/ha	10-A	7,0	4,5	21,0	20,7	14,4	12,4	4,2	3,4	7,2	5,9
	10-B	7,0	5,1	21,0	21,2	14,4	12,4	4,2	3,7	7,2	6,4
	10-C	7,0	4,3	21,0	19,2	14,4	12,3	4,2	3,5	7,2	6,1
solo+lodo APLIC. ÚNICA taxa: 15 tds/ha	15-A (2e3)	6,9	6,4	36,0	63,7	14,7	13,1	4,3	4,0	7,4	6,9
	15-B (2)	6,9	4,5	36,0	38,9	14,7	14,0	4,3	4,1	7,4	7,1
	15-C (2e3)	6,9	6,8	36,0	56,6	14,7	13,4	4,3	4,0	7,4	7,0
solo-controle da 1ª reaplic. cuba 5 acum. 5 tds/ha	5R1-A	6,2	5,2	21,0	59,3	13,2	12,0	4,2	4,0	7,2	6,9
	5R1-B	6,2	5,0	21,0	34,5	13,2	12,5	4,2	4,2	7,2	7,2
	5R1-C	6,2	5,1	21,0	40,0	13,2	12,5	4,2	4,1	7,2	7,1
solo+lodo 1ª reaplic. cuba 5 acum.: 10 tds/ha	10R1-A	6,3	3,5	21,0	36,7	13,9	12,8	4,4	4,2	7,7	7,2
	10R1-B	6,3	3,7	21,0	22,6	13,9	13,0	4,4	4,2	7,7	7,2
	10R1-C	6,3	3,7	21,0	24,5	13,9	13,3	4,4	4,2	7,7	7,2
solo-controle da 2ª reaplic. cuba 5 acum.: 10 tds/ha	10R2-A	5,3	3,5	21,0	21,7	13,8	12,0	4,0	4,1	6,9	7,0
	10R2-B	5,3	3,2	21,0	20,6	13,8	13,9	4,0	4,4	6,9	7,6
	10R2-C	5,3	3,2	21,0	19,7	13,8	13,7	4,0	4,2	6,9	7,2
solo+lodo 2ª reaplic. cuba 5 acum.: 15 tds/ha	15R2-A	5,9	3,5	21,0	21,8	14,5	13,5	4,4	3,9	7,6	6,8
	15R2-B	5,9	3,2	21,0	20,5	14,5	13,2	4,4	4,4	7,6	7,6
	15R2-C	5,9	3,2	21,0	19,3	14,5	13,1	4,4	4,3	7,6	7,3
solo-controle da 2ª reaplic. cuba 5 acum.: 15 tds/ha	15R3-A	5,4	5,6	21,0	19,6	13,5	13,4	4,4	4,0	7,6	6,9
	15R3-B	5,4	5,6	21,0	19,5	13,5	13,6	4,4	4,3	7,6	7,4
	15R3-C	5,4	5,6	21,0	18,6	13,5	13,5	4,4	4,2	7,6	7,3
solo+lodo 3ª reaplic. cuba 5 acum.: 20 tds/ha	20R3-A	5,6	5,5	21,0	19,6	14,1	13,5	4,6	4,2	8,0	7,3
	20R3-B	5,6	5,4	21,0	19,2	14,1	14,3	4,6	4,2	8,0	7,3
	20R3-C (3)	5,6	6,7	21,0	38,8	14,1	13,4	4,6	4,4	8,0	7,5
solo-controle da 4ª reaplic. cuba 5 acum.: 20 tds/ha	20R4-A	5,2	5,4	21,0	21,4	13,3	13,1	3,8	4,3	6,6	7,4
	20R4-B	5,2	5,4	21,0	16,9	13,3	13,7	3,8	3,9	6,6	6,8
	20R4-C	5,2	5,4	21,0	19,4	13,3	13,0	3,8	4,1	6,6	7,0
solo+lodo 4ª reaplic. cuba 5 acum.: 25 tds/ha	25R4-A	5,8	5,8	21,0	20,1	14,2	13,3	4,5	4,4	7,8	7,6
	25R4-B	5,8	5,3	21,0	19,1	14,2	13,9	4,5	4,0	7,8	6,9
	25R4-C	5,8	5,2	21,0	19,2	14,2	13,8	4,5	4,5	7,8	7,8

OBSERVAÇÕES:

- 1 - Valores iniciais medidos na data da incubação e valores finais, na desativação dos respirômetros
- 2 - Respirômetros 15-A, B e C, incubados c/ teor de umidade de 36 % (secagem ao ar difícil)
- 3 - Respirômetros: 0-C, 15-A, 15-C e 20R3-C, prejudicados pela mistura do KOH c/o solo (frasco tombou)

Tab. 6.1.12 - 2ª FASE - ACOMPANHAMENTO DA GRGC NOS RESPIRÔMETROS: 0-A, B, e C e 5-A, B e C

TEMPO DE INCUBAÇÃO DAS AMOSTRAS (dias)		VOL. HCI GASTO NO BRANCO	CUBA "0" - SOLO-CONTROLE									CUBA "5" - MISTURA SOLO-LODO (taxa: 5 tds/ha - 1ª APLICAÇÃO)								
			AMOSTRA 0-A			AMOSTRA 0-B			AMOSTRA 0-C			AMOSTRA 5-A			AMOSTRA 5-B			AMOSTRA 5-C		
			RESPIRÔM. PADRÃO			RESPIRÔM. ALTERN.			RESPIRÔM. ALTERN.			RESPIRÔM. PADRÃO			RESPIRÔM. ALTERN.			RESPIRÔM. ALTERN.		
DATA DA MEDIÇÃO	DIAS ACUM. após 1ª APLIC.	mi	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.
			mi	(1)	(1)	mi	(1)	(1)	mi	(1)	(1)	mi	(1)	(1)	mi	(1)	(1)	mi	(1)	(1)
12/06/95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/06/95	2	14,4	9,8	14,7	14,7	10,0	14,0	14,0	10,4	12,8	12,8	7,6	21,7	21,7	6,7	24,6	24,6	7,0	23,6	23,6
16/06/95	4	14,4	10,3	13,1	27,8	10,5	12,4	26,5	10,9	11,2	23,9	6,8	24,2	45,9	8,4	19,1	43,7	5,8	27,4	51,0
19/06/95	7	13,9	9,5	14,0	41,8	8,1	18,5	45,0	9,7	13,4	37,3	4,8	29,0	75,0	6,5	23,6	67,3	4,9	28,7	79,8
21/06/95	9	13,8	11,1	8,6	50,4	8,3	17,5	62,5	9,7	13,1	50,4	7,7	19,5	94,4	7,6	19,8	87,1	6,5	23,3	103,0
23/06/95	11	14,2	10,0	13,4	63,8	10,0	13,4	75,9	10,0	13,4	63,8	8,6	17,9	112,3	8,4	18,5	105,6	7,6	21,1	124,1
26/06/95	14	13,7	9,5	13,4	77,2	9,6	13,1	89,0	9,7	12,8	76,6	7,3	20,4	132,7	7,4	20,1	125,7	6,6	22,7	146,7
29/06/95	17	14,1	9,7	14,0	91,2	9,7	14,0	103,0	9,5	14,7	91,2	8,5	17,9	150,6	7,8	20,1	145,8	7,7	20,4	167,2
03/07/95	21	14,3	8,8	17,5	108,8	9,6	15,0	118,0	8,5	18,5	109,7	8,4	18,8	169,4	8,5	18,5	164,3	7,8	20,7	187,9
07/07/95	25	13,8	9,0	15,3	124,1	9,0	15,3	133,4	8,9	15,6	125,4	9,8	12,8	182,2	8,7	16,3	180,6	7,9	18,8	206,7
10/07/95	28	13,4	9,7	11,8	135,9	10,8	8,3	141,6	12,5	2,9	128,2	11,7	5,4	187,6	10,0	10,8	191,4	9,6	12,1	218,8
14/07/95	32	13,8	9,5	13,7	149,6	9,4	14,0	155,7	9,7	13,1	141,3	11,2	8,3	195,9	10,8	9,6	201,0	8,8	16,0	234,8
21/07/95	39	14,0	8,1	18,8	168,4	8,3	18,2	173,9	7,7	20,1	161,4	9,5	14,4	210,2	7,5	20,7	221,7	6,7	23,3	258,1
28/07/95	46	13,6	8,2	17,2	185,7	7,7	18,8	192,7	7,8	18,5	179,9	10,0	11,5	221,7	7,9	18,2	239,9	7,6	19,1	277,2
04/08/95	53	14,0	8,8	16,6	202,3	8,9	16,3	209,0	6,2	24,9	204,8	10,5	11,2	232,9	8,4	17,9	257,8	8,2	18,5	295,7
11/08/95	60	17,7	11,4	15,9	218,2	12,8	12,4	221,3	12,4	13,4	218,2	14,1	9,1	242,0	12,1	14,1	271,9	12,1	14,1	309,9
25/08/95	74	17,9	8,5	23,7	241,9	9,9	20,2	241,5	10,1	19,7	237,9	11,1	17,2	259,1	10,2	19,4	291,3	8,7	23,2	333,1
11/09/95	91	17,3	8,0	23,5	265,4	9,1	20,7	262,2	8,7	21,7	259,6	12,2	12,9	272,0	8,4	22,5	313,8	9,1	20,7	353,8
25/09/95	105	17,4	9,6	19,7	285,1	11,3	15,4	277,6	10,5	17,4	277,0	12,3	12,9	284,9	11,0	16,2	330,0	9,3	20,4	374,2
09/10/95	119	17,1	8,4	22,0	307,0	9,0	20,4	298,1	7,1	25,2	302,3	13,8	8,3	293,2	9,2	19,9	349,9	10,1	17,7	391,9
23/10/95	133	15,0	8,4	20,3	327,3	7,9	21,8	319,9	0,1	45,8	348,1	7,7	22,4	315,7	8,8	19,1	369,0	9,6	16,6	408,5
06/11/95	147	14,6	8,6	18,4	345,8	8,2	19,7	339,6	1,7	39,7	387,7	10,6	12,3	328,0	8,1	20,0	389,0	8,8	17,8	426,3
20/11/95	161	18,6	13,1	12,9	358,7	11,7	16,2	355,8	7,5	26,0	413,8	15,3	7,7	335,7	10,6	18,8	407,7	14,2	10,3	436,7
01/12/95	172	18,6	13,6	11,7	370,4	14,2	10,3	366,1	10,6	18,8	432,5	14,2	10,3	346,0	10,6	18,8	426,5	15,6	7,0	443,7

OBS.: (1) UNIDADE: mg de CO2 gerados em 50 g de solo (em bases secas)

Tab. 6.1.13 - 2ª FASE - ACOMPANHAMENTO DA GRGC NOS RESPIRÔMETROS: 10-A, B, C e 15-A, B e C

TEMPO DE INCUBAÇÃO DAS AMOSTRAS (dias)		VOL. HCI GASTO NO BRANC	CUBA "10" - MISTURA SOLO-LODO (taxa de 10 tds/ha - APLICAÇÃO ÚNICA)									CUBA "15" - MISTURA SOLO-LODO (taxa: 15 tds/ha - APLICAÇÃO ÚNICA)								
			AMOSTRA 10-A RESPIRÔM. PADRÃO			AMOSTRA 10-B RESPIRÔM. ALTERN.			AMOSTRA 10-C RESPIRÔM. ALTERN.			AMOSTRA 15-A RESPIRÔM. PADRÃO			AMOSTRA 15-B RESPIRÔM. ALTERN.			AMOSTRA 15-C RESPIRÔM. ALTERN.		
			VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.
DATA DA MEDIÇÃO	DIAS ACUM. após 1 APLIC.	ml	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)
12/06/95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/06/95	2	14,4	5,6	28,1	28,1	6,0	26,8	26,8	5,9	27,1	27,1	2,8	37,2	37,2	3,5	34,9	34,9	3,5	34,9	34,9
16/06/95	4	14,4	6,9	23,9	52,0	8,1	20,1	46,9	7,3	22,7	49,8	0,5	47,8	85,0	1,7	40,7	75,6	1,9	40,1	75,0
19/06/95	7	13,9	7,7	19,8	71,8	7,1	21,7	68,6	6,9	22,3	72,1	0,2	44,0	129,0	3,5	37,0	112,6	6,5	30,6	105,6
21/06/95	9	13,8	8,9	15,6	87,4	8,7	16,3	84,9	8,6	16,6	88,7	4,9	34,0	163,0	5,8	32,1	144,7	5,4	32,9	138,5
23/06/95	11	14,2	8,7	17,5	105,0	8,6	17,9	102,7	9,1	16,3	105,0	9,1	26,7	189,7	6,7	31,8	176,5	3,0	37,5	176,0
26/06/95	14	13,7	7,1	21,1	126,0	7,5	19,8	122,5	7,1	21,1	126,0	11,2	22,4	212,1	7,2	31,0	207,6	4,1	37,6	213,6
29/06/95	17	14,1	7,1	22,3	148,3	7,8	20,1	142,6	7,0	22,7	148,7	12,9	17,7	229,8	11,9	19,9	227,4	10,2	23,5	237,1
03/07/95	21	14,3	7,0	23,3	171,8	6,5	24,9	167,5	7,0	23,3	172,0	12,3	20,3	250,1	12,4	20,1	247,5	10,8	23,5	260,6
07/07/95	25	13,8	8,1	18,2	189,8	7,9	18,8	186,3	7,3	20,7	192,7	13,1	17,3	267,4	13,5	16,5	264,0	9,4	25,2	285,8
10/07/95	28	13,4	10,4	9,6	199,4	8,3	16,3	202,6	9,2	13,4	206,1	16,2	9,0	276,4	16,8	7,7	271,7	12,4	17,1	302,9
14/07/95	32	13,8	10,7	9,9	209,3	7,6	20,1	222,7	7,8	19,1	225,2	14,4	14,1	290,5	15,4	12,0	283,7	10,7	22,0	324,9
21/07/95	39	14,0	5,9	25,8	235,1	6,1	25,2	247,9	3,1	34,8	260,0	10,0	24,4	314,9	12,8	18,4	302,1	6,5	31,8	356,7
28/07/95	46	13,6	8,7	15,6	250,7	6,3	23,3	271,2	7,3	20,1	280,1	4,5	29,0	343,9	5,6	25,5	327,6	2,0	37,0	393,7
04/08/95	53	14,0	9,0	16,0	266,7	7,3	21,4	292,5	7,4	21,1	301,2	5,4	27,4	371,4	4,8	29,3	357,0	4,3	30,9	424,7
11/08/95	60	17,7	11,6	15,7	282,4	11,0	16,9	309,5	9,6	20,4	321,6	8,3	23,7	395,1	9,2	21,5	378,4	7,3	26,3	450,9
25/08/95	74	17,9	6,8	28,0	310,4	6,5	28,8	338,2	3,3	36,9	358,5	4,8	33,1	428,2	7,9	25,2	403,7	2,7	38,4	489,3
11/09/95	91	17,3	0,0	43,7	354,0	1,8	39,1	377,4	-1,0	46,2	404,7	4,3	32,8	461,0	7,5	24,7	428,4	1,1	40,9	530,2
25/09/95	105	17,4	1,9	39,1	393,2	3,4	35,3	412,7	-0,4	44,9	449,6	7,3	25,5	486,5	10,3	17,9	446,3	4,2	33,3	563,5
09/10/95	119	17,1	-6,9	60,6	453,8	3,1	35,3	448,0	-6,9	60,6	510,2	5,6	29,0	515,5	8,2	22,5	468,8	5,7	28,8	592,3
23/10/95	133	15,0	-4,5	60,0	513,7	0,9	43,4	491,4	-6,2	65,2	576,4	7,2	24,0	539,5	8,8	19,1	487,9	5,4	29,5	621,8
06/11/95	147	14,6	-2,4	52,3	566,0	-0,2	45,5	536,9	-1,1	48,3	623,6	7,2	22,8	562,2	8,7	18,1	506,0	6,2	25,8	647,6
20/11/95	161	18,6	3,7	34,9	600,9	-4,3	53,7	590,6	4,2	33,8	657,4	12,6	14,1	576,3	13,8	11,3	517,3	10,0	20,2	667,8
01/12/95	172	18,6	6,5	28,4	629,3	10,4	19,2	609,8	9,0	22,5	679,9	13,1	12,9	589,2	15,1	8,2	525,5	12,1	15,2	683,0
OBS.: (1) UNIDADE: mg de CO2 gerados em 50 g de solo (em bases secas)																				

Tab. 6.1.14 - 2ª FASE - ACOMPANHAMENTO DA GRGC NOS RESPIRÔMETROS: 5R1-A, B, C e 10R1-A, B e C

TEMPO DE INCUBAÇÃO DAS AMOSTRAS (dias)		VOL. HCI GASTO NO BRANCO	SOLO-CONTROLE (taxa: 5 tds/ha da 1ª aplicação)									MISTURA SOLO-LODO (taxa: 10 tds/ha - 1ª REAPLICAÇÃO c/ 5 tds/ha)									TEMPO REAL DE INCUB.
			AMOSTRA 5R1-A RESPIRÔM. PADRÃO			AMOSTRA 5R1-B RESPIRÔM. ALTERN.			AMOSTRA 5R1-C RESPIRÔM. ALTERN.			AMOSTRA 10R1-A RESPIRÔM. PADRÃO			AMOSTRA 10R1-B RESPIRÔM. ALTERN.			AMOSTRA 10R1-C RESPIRÔM. ALTERN.			
			VOL. HCI	GRQC CALC.	GRQC ACUM.	VOL. HCI	GRQC CALC.	GRQC ACUM.	VOL. HCI	GRQC CALC.	GRQC ACUM.	VOL. HCI	GRQC CALC.	GRQC ACUM.	VOL. HCI	GRQC CALC.	GRQC ACUM.	VOL. HCI	GRQC CALC.	GRQC ACUM.	
DATA DA MEDIÇÃO	DIAS ACUM. após 1ª APLIC.	ml	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	(dias)
12/06/95	0																				
03/07/95	21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
06/07/95	23	13,8	8,3	17,5	17,5	7,1	21,4	21,4	6,5	23,3	23,3	6,8	25,5	25,5	6,9	26,2	26,2	6,1	24,6	24,6	2
07/07/95	25	13,5	9,8	12,4	30,0	8,8	16,0	36,4	9,1	14,0	37,3	6,5	22,3	47,9	7,1	20,4	45,6	6,5	22,3	46,9	4
10/07/95	28	14,3	9,9	14,0	44,0	9,5	16,3	51,7	10,0	13,7	51,0	6,4	25,2	73,1	6,3	25,5	71,1	6,2	25,8	72,7	7
14/07/95	32	14,1	8,6	17,5	61,6	7,8	20,1	71,8	7,8	20,1	71,1	5,6	27,1	100,2	7,9	19,8	90,9	5,0	29,0	101,8	11
17/07/95	35	14,3	9,8	14,4	75,9	9,3	16,0	87,7	8,9	17,2	88,4	9,3	16,0	116,1	8,5	18,5	109,4	8,7	17,9	119,6	14
21/07/95	39	14,0	9,3	16,0	90,9	8,5	17,5	105,3	8,4	17,9	106,2	8,9	16,3	132,4	7,6	20,4	129,8	7,8	19,8	139,4	18
24/07/95	42	13,6	9,2	14,0	105,0	9,3	13,7	119,0	9,8	12,1	118,4	11,0	8,3	140,7	9,5	13,1	142,9	10,5	9,9	149,3	21
28/07/95	46	13,9	10,2	11,8	116,8	7,9	19,1	138,1	8,1	18,5	136,9	9,9	12,8	163,4	8,2	18,2	161,1	9,2	16,0	164,3	25
31/07/95	49	14,0	10,7	10,5	127,3	9,2	15,3	153,4	9,3	15,0	151,9	11,5	8,0	161,4	9,5	14,4	175,5	10,8	10,2	174,5	28
04/08/95	53	13,8	10,4	10,8	138,1	8,2	17,9	171,3	8,8	16,0	167,8	11,7	6,7	168,1	8,7	16,3	191,7	9,8	12,8	187,3	32
11/08/95	60	17,7	11,7	15,1	153,3	10,1	19,2	190,5	9,9	19,7	187,5	13,3	11,1	179,2	10,8	17,4	209,1	11,6	15,4	202,7	39
18/08/95	67	17,9	12,0	14,9	168,2	13,5	11,1	201,6	11,1	17,2	204,7	13,4	11,4	190,6	11,0	17,4	226,6	11,7	15,7	218,3	46
25/08/95	74	17,6	11,6	15,1	183,3	11,1	16,4	218,0	11,0	16,7	221,3	13,4	10,6	201,2	11,8	14,6	241,2	11,4	15,7	234,0	53
11/09/95	91	17,3	8,7	21,7	205,0	7,1	25,7	243,8	6,4	30,0	251,4	11,2	15,4	216,6	8,7	21,7	262,9	7,0	26,0	260,0	70
25/09/95	106	17,4	10,7	16,9	221,9	8,9	21,5	265,2	9,6	19,7	271,1	12,1	13,4	230,0	11,4	15,1	278,1	8,4	22,7	282,7	84
09/10/95	119	17,1	9,3	19,7	241,6	8,9	20,7	285,9	9,2	19,9	291,0	10,6	16,4	246,4	10,1	17,7	296,7	10,0	17,9	300,6	98
23/10/95	133	15,0	9,4	17,2	258,9	9,1	18,1	304,1	8,8	19,1	310,1	9,6	16,6	263,0	9,6	16,6	312,3	8,6	19,7	320,3	112
06/11/95	147	14,6	8,7	18,1	277,0	8,9	17,5	321,6	6,0	26,4	336,5	10,2	13,5	276,5	9,7	15,1	327,4	8,6	18,4	338,7	126
20/11/95	161	18,6	13,6	11,7	288,7	14,0	10,8	332,4	9,4	21,6	358,1	14,0	10,8	287,3	14,8	8,9	336,3	14,2	10,3	349,1	140
01/12/95	172	18,6	14,1	10,6	299,3	15,8	6,6	338,9	14,9	8,7	366,7	14,8	8,9	296,2	16,1	5,9	342,2	14,9	8,7	357,7	151
OBS.: (1) UNIDADE: mg de CO2 gerados em 50 g de solo (em bases secas)																					

Tab. 6.1.15 - 2ª FASE - ACOMPANHAMENTO DA GRGC NOS RESPIRÔMETROS: 10R2-A, B, C e 15R2-A, B e C

TEMPO DE INCUBAÇÃO DAS AMOSTRAS (dias)		VOL. HCI GASTO NO BRANCO	SOLO-CONTROLE taxa acum.: 10 tds/ha das 2 aplic. anteriores									MISTURA SOLO-LODO taxa acum. 15 tds/ha - 2ª reaplic. c/ 5 tds/ha									TEMPO REAL DE INCUBAÇÃO
			AMOSTRA 10R2-A RESP. PADRAO			AMOSTRA 10R2-B RESP. ALTERN.			AMOSTRA 10R2-C RESP. ALTERN.			AMOSTRA 15R2-A RESP. PADRAO			AMOSTRA 15R2-B RESP. ALTERN.			AMOSTRA 15R2-C RESP. ALTERN.			
			VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	
DATA DA MEDIÇÃO	DIAS ACUM. APOs 1ª APLIC.	ml	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	(dias)
12/08/96	0																				
07/08/96	66	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
11/08/96	60	17,7	9,8	19,9	19,9	4,1	34,3	34,3	4,6	33,3	33,3	10,5	18,2	18,2	4,9	32,3	32,3	4,2	34,1	34,1	4
14/08/96	63	17,9	14,2	9,3	29,3	11,8	15,4	49,7	11,0	17,4	50,7	13,2	11,9	30,0	11,5	16,2	48,5	12,1	14,6	48,7	7
18/08/96	67	17,6	15,1	6,1	35,3	12,5	12,6	62,4	12,4	12,9	63,6	16,1	6,1	36,1	11,8	14,4	62,9	12,2	13,4	62,1	11
25/08/96	74	17,6	12,7	12,4	47,7	11,2	16,2	78,5	11,5	15,4	79,0	12,5	12,9	49,0	11,7	14,9	77,8	12,0	14,1	76,2	18
11/09/96	91	17,3	12,6	11,9	69,6	8,7	21,7	100,2	8,3	22,7	101,7	10,2	17,9	66,9	8,0	23,5	101,2	9,6	19,7	95,9	35
25/09/96	106	17,4	13,2	10,6	70,2	11,6	14,6	114,9	8,8	21,7	123,4	12,8	11,6	78,5	11,0	16,2	117,4	11,2	15,7	111,6	49
09/10/96	119	17,1	11,6	13,9	84,1	9,4	19,4	134,3	9,1	20,2	143,6	11,5	14,1	92,6	8,9	20,7	138,1	9,9	18,2	129,8	63
23/10/96	133	15,0	11,1	12,0	96,1	8,8	19,1	163,4	9,0	18,4	162,1	10,5	13,8	106,5	8,2	20,9	159,0	8,9	18,8	148,5	77
06/11/96	147	14,6	11,1	10,8	106,8	9,0	17,2	170,6	7,6	21,5	183,6	10,7	12,0	118,5	9,2	16,6	175,6	8,6	18,4	167,0	91
20/11/96	161	18,6	12,2	15,0	121,8	13,7	11,5	182,1	10,3	19,5	203,1	15,6	7,0	126,5	10,6	18,8	194,4	12,7	13,8	180,8	105
01/12/96	172	18,6	11,1	17,6	139,4	14,6	9,4	191,4	12,3	14,8	217,8	16,8	4,2	129,7	11,9	15,7	210,1	15,1	8,2	189,0	116
OBS.: UNIDADE: mg de CO2 gerados em 50 g de solo (em bases secas)																					

Tab. 6.1.16 - 2ª FASE - ACOMPANHAMENTO DA GRGC NOS RESPIRÔMETROS: 15R3-A, B, C e 20R3-A, B e C

TEMPO DE INCUBAÇÃO DAS AMOSTRAS (dias)		VOL. HCI GASTO NO BRANCO	SOLO-CONTROLE (taxa acum.: 15 tde/ha das 3 aplic. anteriores)									MISTURA SOLO-LODO (taxa acum. 20 tde/ha - 3ª resplic. c/ 5 tde/ha)									TEMPO REAL DE INCUB.
			AMOSTRA 15R3-A RESP. PADRAO			AMOSTRA 15R3-B RESP. ALTERN.			AMOSTRA 15R3-C RESP. ALTERN.			AMOSTRA 20R3-A RESP. PADRAO			AMOSTRA 20R3-B RESP. ALTERN.			AMOSTRA 20R3-C RESP. ALTERN.			
DATA DA MEDIÇÃO	DIAS ACUM. APÓS 1ª APLIC.	ml	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	(dias)
12/08/95	0		ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	
04/09/95	84	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
06/09/95	86	17,3	12,8	11,4	11,4	12,6	11,9	11,9	13,5	9,6	9,6	6,7	26,8	26,8	8,0	23,5	23,5	8,1	23,2	23,2	2
11/09/95	91	17,9	13,4	11,4	22,7	11,7	16,7	27,6	12,6	13,6	23,2	2,1	39,9	66,8	4,2	34,6	68,1	4,5	33,8	67,1	7
14/09/95	94	17,4	15,6	4,5	27,3	15,7	4,3	31,8	15,8	4,0	27,3	11,4	15,1	81,8	12,3	12,9	70,9	12,5	12,4	69,4	10
18/09/95	98	17,5	14,9	6,6	33,8	14,5	7,6	39,4	15,3	5,6	32,8	11,2	15,9	97,7	11,5	15,1	86,1	11,8	14,4	83,8	14
25/09/95	105	17,2	14,5	6,8	40,6	14,2	7,6	47,0	14,6	6,6	39,4	11,3	14,9	112,6	11,7	13,9	100,0	11,3	14,9	98,7	21
02/10/95	112	17,2	14,1	7,8	48,5	14,2	7,6	54,5	14,8	6,1	45,4	11,6	14,1	126,7	11,7	13,9	113,9	12,1	12,9	111,6	28
09/10/95	119	17,1	13,1	10,1	58,6	13,7	8,6	63,1	13,7	8,6	64,0	11,4	14,4	141,1	11,7	13,6	127,5	12,3	12,1	123,7	35
23/10/95	133	15,0	10,9	12,6	71,2	9,9	15,7	78,8	10,2	14,8	68,8	8,8	19,1	160,2	7,8	22,1	149,6	0,5	44,6	168,3	49
05/11/95	147	14,6	10,5	12,6	83,8	10,2	13,5	92,3	10,7	12,0	80,8	8,4	19,1	179,2	3,8	33,2	182,8	9,0	17,2	185,5	63
20/11/95	161	18,6	15,2	8,0	91,7	13,7	11,5	103,8	14,3	10,1	90,9	12,4	14,5	193,8	12,4	14,5	197,4	9,2	22,0	207,5	77
01/12/95	172	18,6	15,6	7,0	98,8	16,9	4,0	107,8	15,6	7,0	97,9	14,8	8,9	202,7	15,2	8,0	205,3	12,1	15,2	222,8	88
OBS.: UNIDADE: mg de CO2 gerados em 50 g de solo seco																					

OBS.: UNIDADE: mg de CO2 gerados em 50 g de solo seco

Tab. 6.1.17 - 2ª FASE - ACOMPANHAMENTO DA GRGC NOS RESPIROMETROS: 20R4-A, B, C e 25R4-A, B e C

TEMPO DE INCUBAÇÃO DAS AMOSTRAS (dias)		VOL. HCI GASTO NO BRANCO	SOLO-CONTROLE (taxa acum.: 20 tds/ha das 4 aplicações anteriores)									MISTURA SOLO-LODO (taxa acum. 25 tds/ha - 4ª REAPLICAÇÃO c/ 5 tds/ha)									TEMPO REAL DE INCUB.
			AMOSTRA 20R4-A RESP. PADRAO			AMOSTRA 20R4-B RESP. ALTERN.			AMOSTRA 20R4-C RESP. ALTERN.			AMOSTRA 25R4-A RESP. PADRAO			AMOSTRA 25R4-B RESP. ALTERN.			AMOSTRA 25R4-C RESP. ALTERN.			
DATA DA MEDIÇÃO	DIAS ACUM. APOS 1ª APLIC.	ml	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	VOL. HCI	GRGC CALC.	GRGC ACUM.	(dias)
12/06/95	0		ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	ml	(1)	(1)	
02/10/95	112	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
04/10/95	114	17,1	12,7	11,1	11,1	12,3	12,1	12,1	12,6	11,6	11,6	6,4	27,0	27,0	4,3	32,3	32,3	7,4	24,5	24,5	2
06/10/95	116	17,5	14,4	7,8	18,9	14,0	8,8	21,0	12,6	12,4	24,0	7,8	24,5	61,5	10,6	17,7	50,0	9,8	19,4	43,9	4
09/10/95	119	17,6	13,1	11,4	30,3	11,7	14,9	36,8	11,2	16,2	40,1	7,8	24,7	76,2	10,1	18,9	68,9	7,3	26,0	69,9	7
13/10/95	123	15,0	11,7	10,1	40,4	11,4	11,1	46,9	11,2	11,7	61,8	6,5	26,1	102,4	9,0	18,4	87,4	8,5	20,0	89,9	11
18/10/95	128	14,8	11,8	9,2	49,7	11,8	9,2	66,1	11,9	8,9	60,7	8,4	19,7	122,0	9,3	16,9	104,3	9,2	17,2	107,1	16
23/10/95	133	14,8	10,6	12,9	62,6	12,3	7,7	63,8	11,1	11,4	72,1	9,2	17,2	139,3	9,2	17,2	121,5	9,3	16,9	124,0	21
30/10/95	140	14,6	10,6	12,3	74,9	11,5	9,5	73,4	10,7	12,0	84,1	8,4	19,1	158,3	9,0	17,2	138,7	9,2	16,6	140,6	28
06/11/95	147	14,8	10,8	12,3	87,2	11,4	10,5	83,8	10,5	13,2	97,3	13,8	3,1	161,4	8,0	20,9	169,6	9,2	17,2	167,9	35
20/11/95	161	18,6	12,0	15,5	102,6	12,7	13,8	97,6	12,5	14,3	111,6	8,5	23,7	185,1	11,2	17,3	177,0	10,6	18,8	176,6	49
01/12/95	172	18,6	14,3	10,1	112,7	15,6	7,0	104,7	13,6	11,7	123,4	11,5	16,6	201,7	16,0	6,1	183,1	13,5	12,0	188,6	60
OBS.: UNIDADE: mg de CO2 gerados em 60 g de solo (em bases secas)																					

Tab. 6.1.19 - 2ª FASE - ACOMPANHAMENTO DA GRGC - Valores médios para a 1ª e 2ª reaplic. de lodo na CUBA 5, com taxas repetidas de 5 tds/ha e respectivos solos-controle

Tempo acum. após 1ª aplic. (dias)	Controle - 1ª reaplic. taxa acum. 5 tds/ha RESP. 5R1-A, B e C			SOLO+LODO - 1ª reaplic. taxa acum. 10 tds/ha RESP. 10R1-A, B e C				Controle - 2ª reaplic. taxa acum. 10 tds/ha RESP. 10R2-A, B e C			SOLO+LODO - 2ª reaplic. taxa acum. 15 tds/ha RESP. 15R2-A, B e C			
	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA
	3 resp. (1)	acum. (1)	diária (1)	3 resp. (1)	acum. (1)	diária (1)	efetiva (1)	3 resp. (1)	acum. (1)	diária (1)	3 resp. (1)	acum. (1)	diária (1)	efetiva (1)
0														
21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0							
23	20,7	20,7	10,4	25,1	25,1	12,6	4,4							
25	13,8	34,5	8,6	21,7	46,8	11,7	12,3							
28	14,4	48,9	7,0	25,5	72,3	10,3	23,4							
32	19,2	68,1	6,2	25,3	97,6	8,9	29,5							
35	15,8	83,9	6,0	17,4	115,0	8,2	31,1							
39	16,8	100,7	5,6	18,8	133,8	7,4	33,1							
42	13,3	114,0	5,4	10,4	144,2	6,9	30,2							
46	16,5	130,5	5,2	15,3	159,5	6,4	29,0							
49	13,6	144,1	5,1	10,8	170,3	6,1	26,2							
53	14,9	159,0	5,0	11,9	182,2	5,7	23,2							
56		166,7	4,8		188,5	5,4	21,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
60	18,0	177,0	4,5	14,6	196,8	5,0	19,8	29,2	29,2	7,3	28,2	28,2	7,1	-1,0
63		183,2	4,4		203,1	4,8	20,0	14,1	43,3	6,2	14,2	42,4	6,1	-0,9
67	14,4	191,4	4,2	14,8	211,6	4,6	20,2	10,5	53,8	4,9	11,3	53,7	4,9	-0,1
74	16,1	207,5	3,9	13,6	225,2	4,2	17,7	14,6	68,4	3,8	14,0	67,7	3,8	-0,7
84		222,7	3,5		237,6	3,8	14,9		79,5	2,8		79,7	2,8	0,2
86		225,7	3,5		240,0	3,7	14,3		81,7	2,7		82,1	2,7	0,4
91	25,8	233,3	3,3	21,0	246,2	3,5	12,9	18,8	87,2	2,5	20,4	88,1	2,5	0,9
94		237,5	3,3		249,9	3,4	12,4		90,6	2,4		91,2	2,4	0,6
98		243,0	3,2		254,8	3,3	11,7		95,0	2,3		95,4	2,3	0,3
105	19,4	252,7	3,0	17,1	263,3	3,1	10,6	15,7	102,9	2,1	14,5	102,6	2,1	-0,3
112		262,8	2,9		272,0	3,0	9,2		111,8	2,0		111,5	2,0	-0,4
114		265,6	2,9		274,4	3,0	8,8		114,3	2,0		114,0	2,0	-0,4
116		268,5	2,8		276,9	2,9	8,4		116,9	1,9		116,5	1,9	-0,4
119	20,1	272,8	2,8	17,3	280,6	2,9	7,8	17,8	120,7	1,9	17,7	120,3	1,9	-0,4
123		278,0	2,7		285,6	2,8	7,7		125,4	1,9		125,4	1,9	-0,0
128		284,4	2,7		291,9	2,7	7,5		131,3	1,8		131,7	1,8	0,4
133	18,1	290,9	2,6	17,6	298,2	2,7	7,3	16,5	137,2	1,8	17,8	138,1	1,8	0,9
140		301,3	2,5		306,1	2,6	4,8		145,5	1,7		146,0	1,7	0,5
147	20,7	311,6	2,5	15,7	313,9	2,5	2,3	16,5	153,7	1,7	15,7	153,8	1,7	0,1
161	14,7	326,3	2,3	10,0	323,9	2,3	-2,4	15,3	169,0	1,6	13,2	167,0	1,6	-2,0
172	8,6	334,9	2,2	7,8	331,7	2,2	-3,2	13,9	182,9	1,6	9,4	176,4	1,5	-6,5
OBS.: (1) UNIDADE: mg de CO2 gerados em 50 gramas de solo (em bases secas)														

6.2 - FIGURAS

Neste item são apresentadas as **Fig. 6.2.1 a 6.2.18**, elaboradas a partir dos dados apresentados nas tabelas do **item 6.1**.

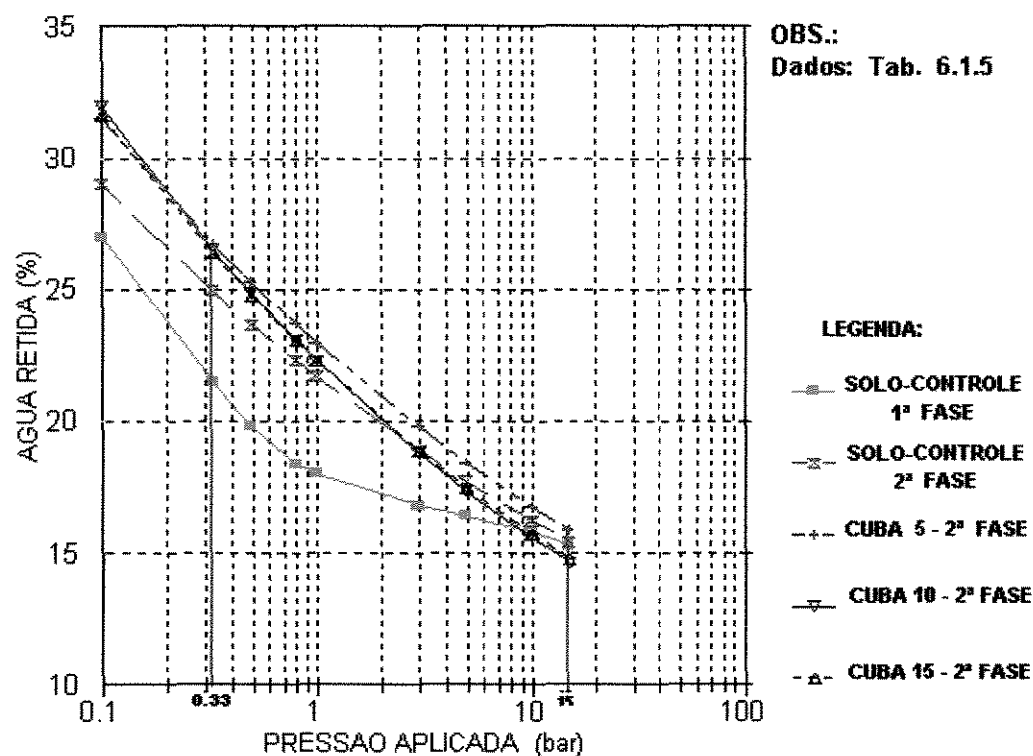


Fig. 6.2.1 - CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO
1ª e 2ª FASES.

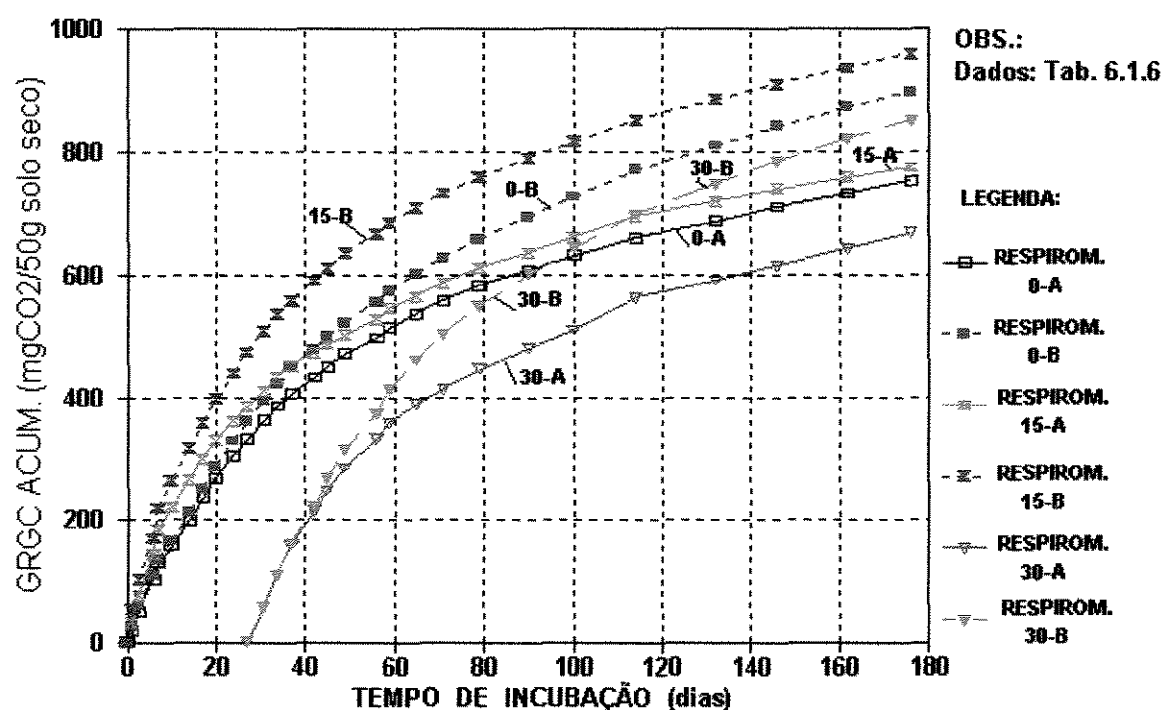


Fig. 6.2.2 - 1ª FASE - CURVAS: GRGC ACUM. x TEMPO
Respirômetros: 0-A e B; 15-A e B; 30-A e B

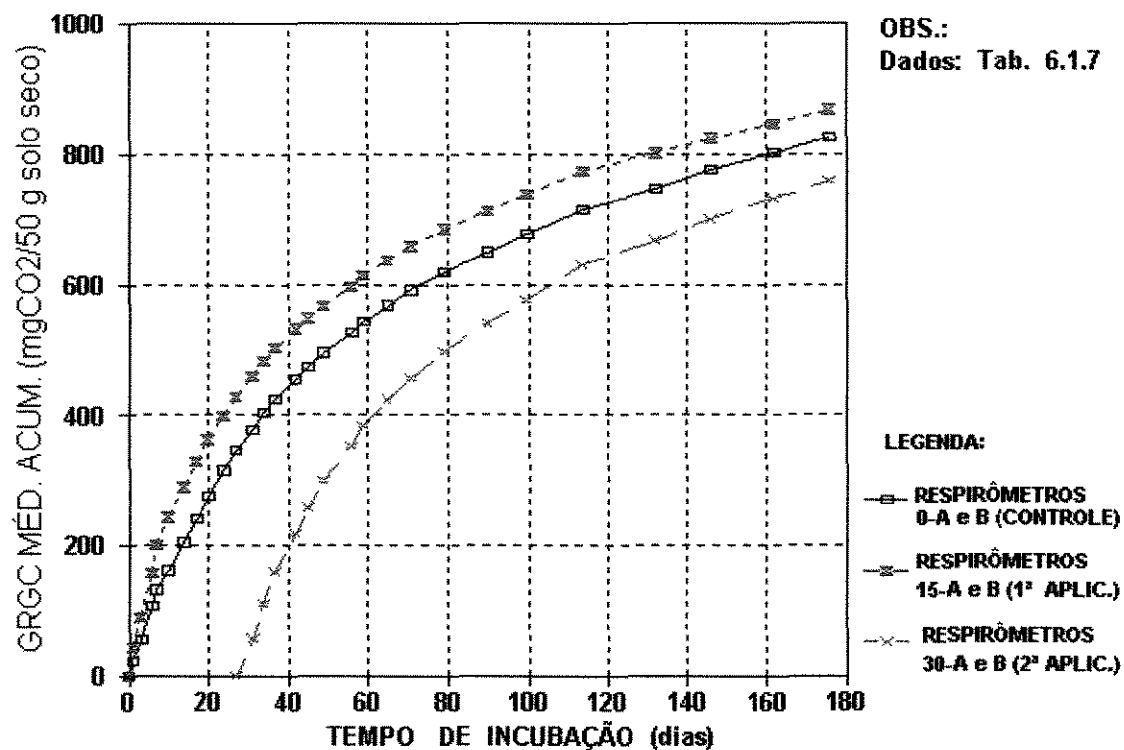


Fig. 6.2.3 - 1ª FASE - CURVAS: GRGC MÉDIA ACUM. x TEMPO
(média de 2 respiômetros)

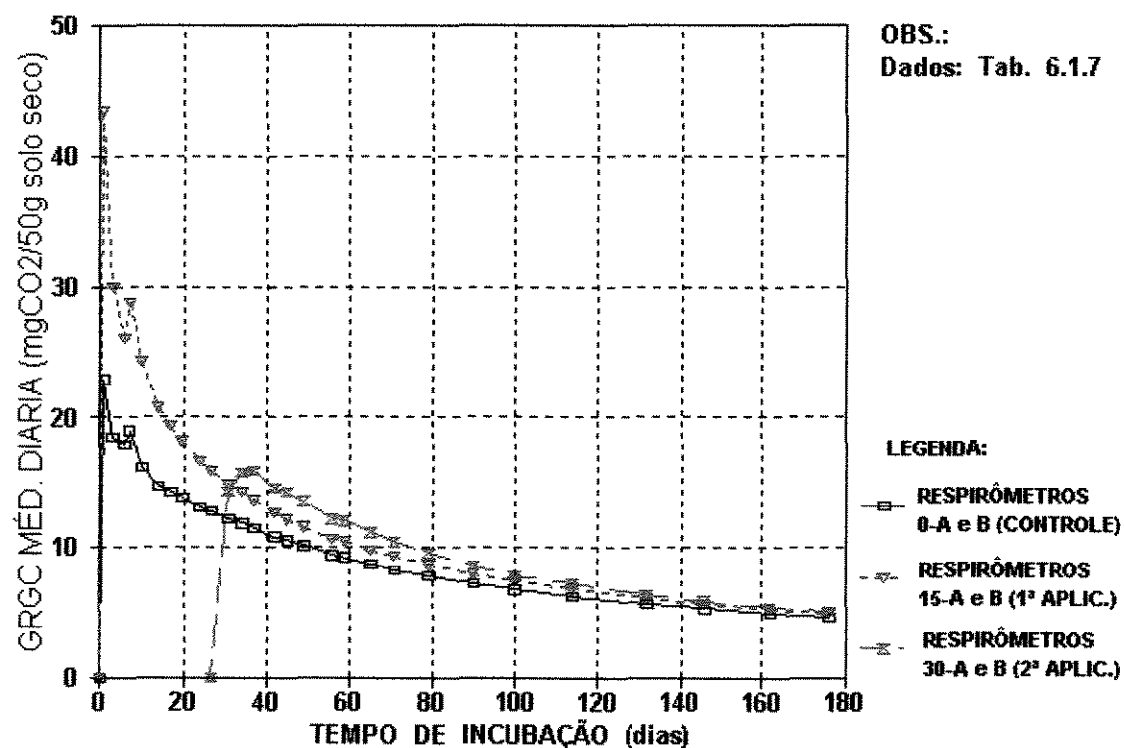


Fig. 6.2.4 - 1ª FASE - CURVAS: GRGC MÉDIA DIÁRIA x TEMPO
(média de 2 respiômetros)

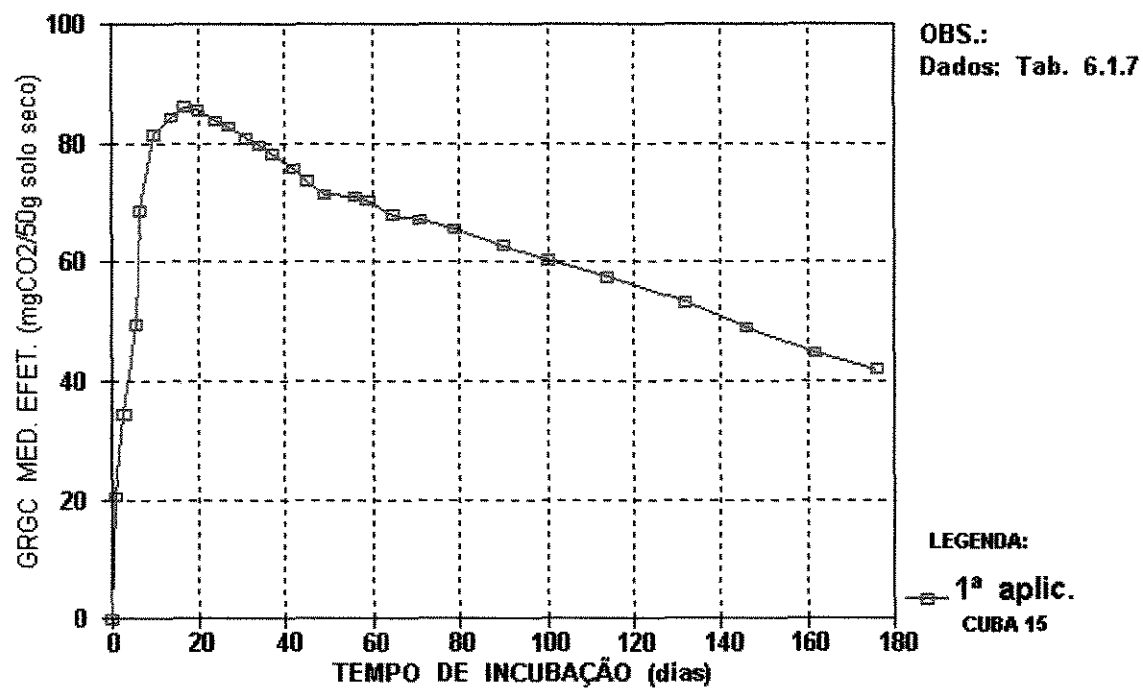


Fig. 6.2.5 - 1ª FASE - CURVA: GRGC MÉDIA EFETIVA x TEMPO
(para a 1ª aplicação de lodo na cuba 15)

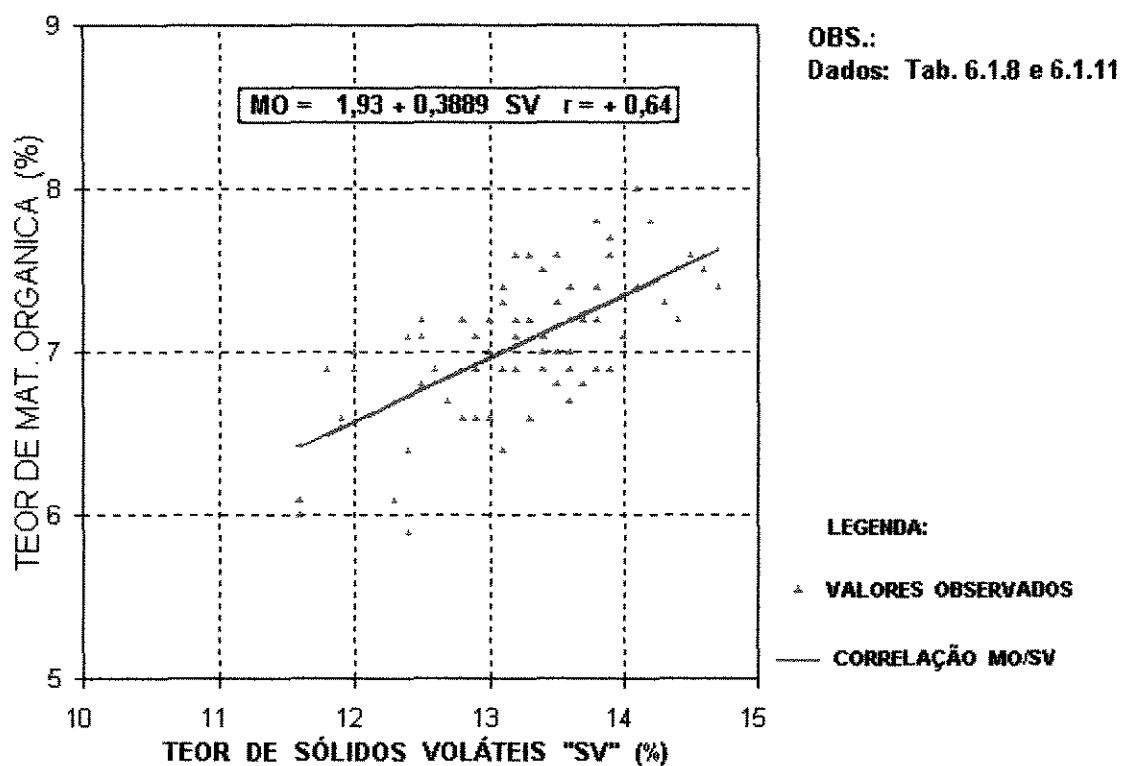


FIG. 6.2.6 - 2ª FASE - CORRELAÇÃO MO/SV DAS AMOSTRAS
COLETADAS NAS CUBAS e NOS RESPIRÔMETROS

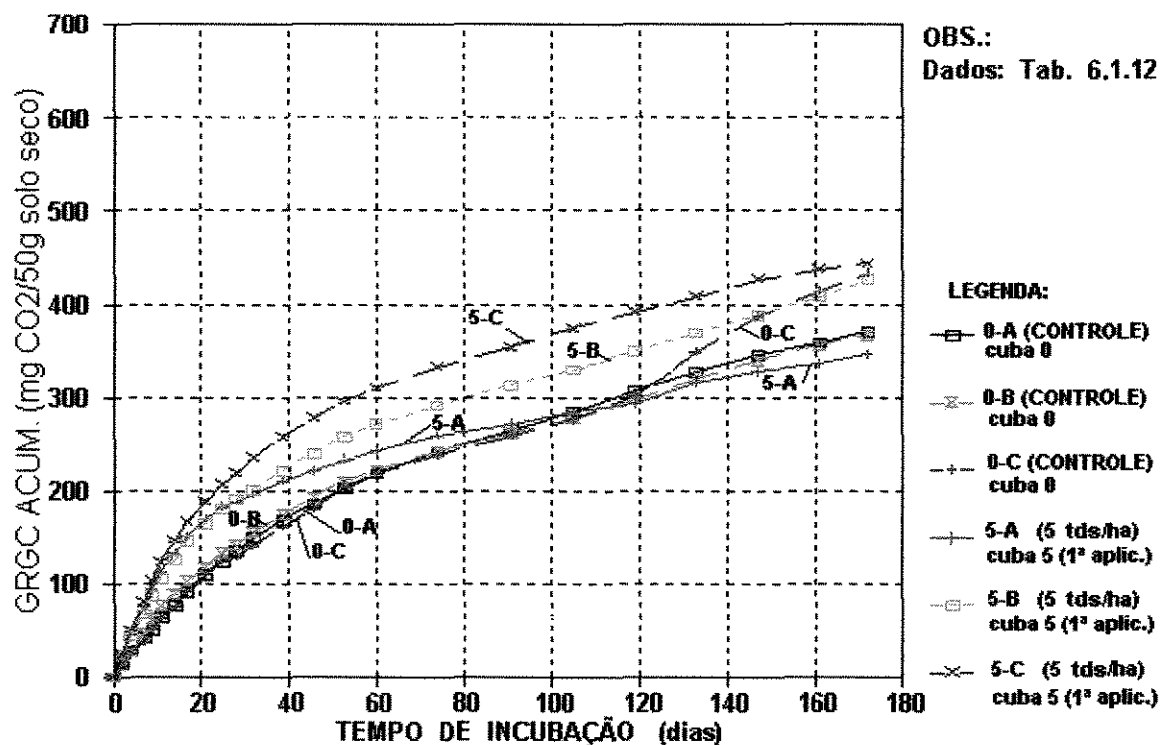


Fig. 6.2.7 - 2ª FASE - CURVAS: GRGC ACUM. x TEMPO
(Respirômetros: 0-A, B e C; 5-A, B e C)

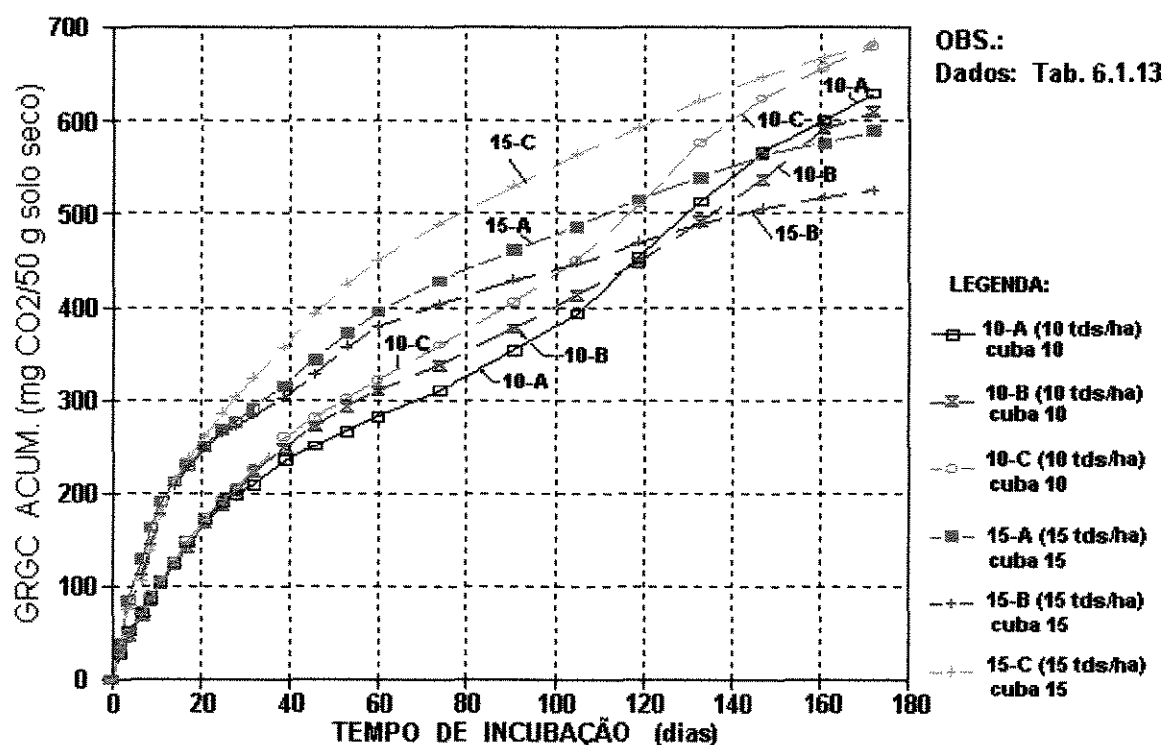


Fig. 6.2.8 - 2ª FASE - CURVAS: GRGC ACUM. x TEMPO
(Respirômetros: 10-A, B e C; 15-A, B e C)

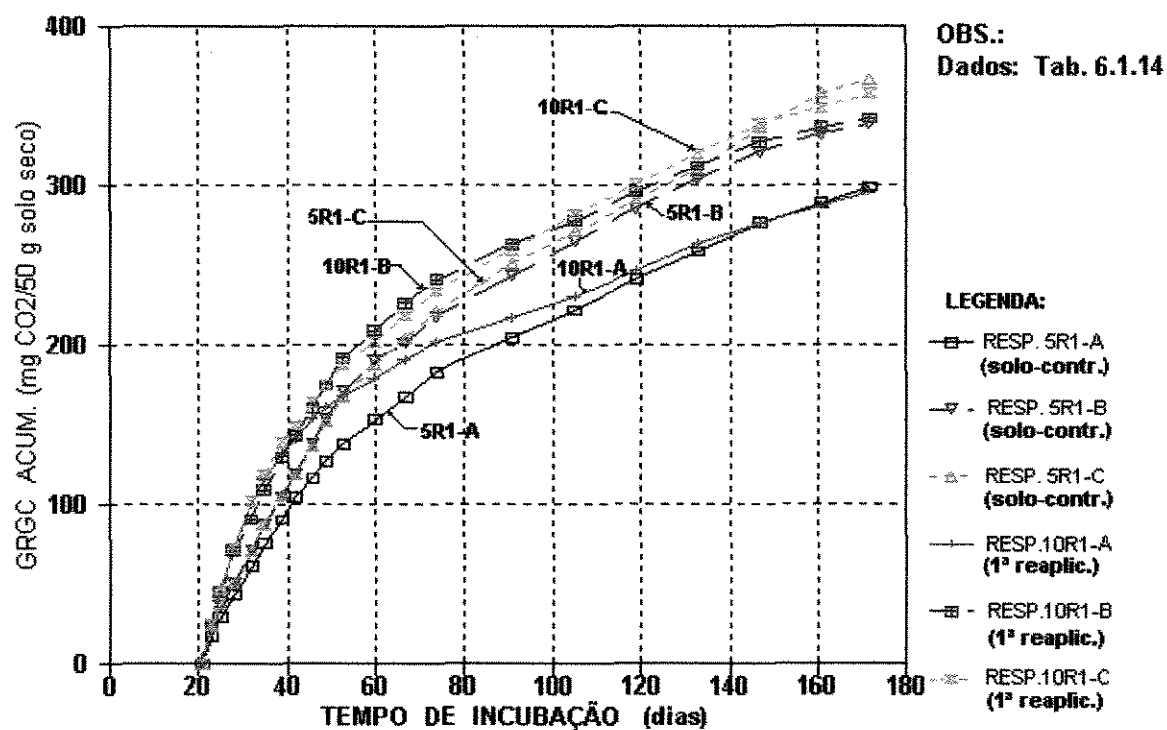


Fig. 6.2.9 - 2ª FASE - CURVAS: GRGC ACUM. x TEMPO
(Respirômetros: 5R1-A, B e C; 10R1-A, B e C)

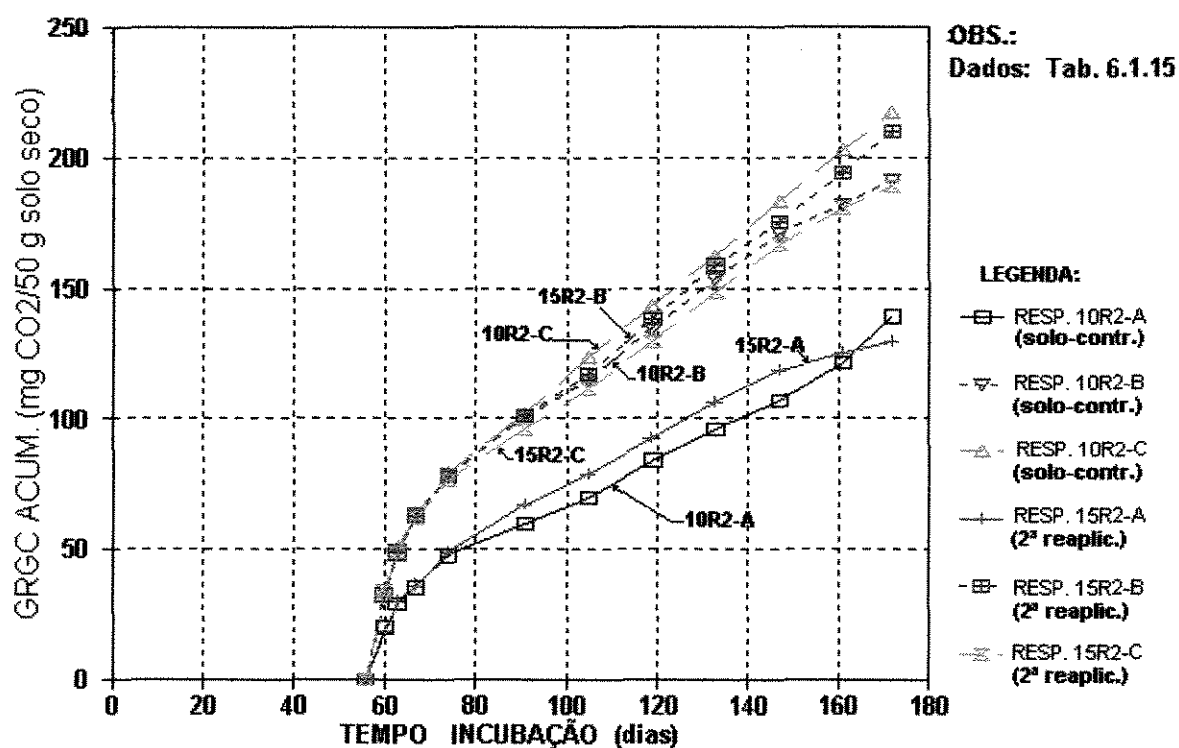


Fig. 6.2.10 - 2ª FASE - CURVAS: GRGC ACUM. x TEMPO
(Respirômetros: 10R2-A, B e C; 15R2-A, B e C)

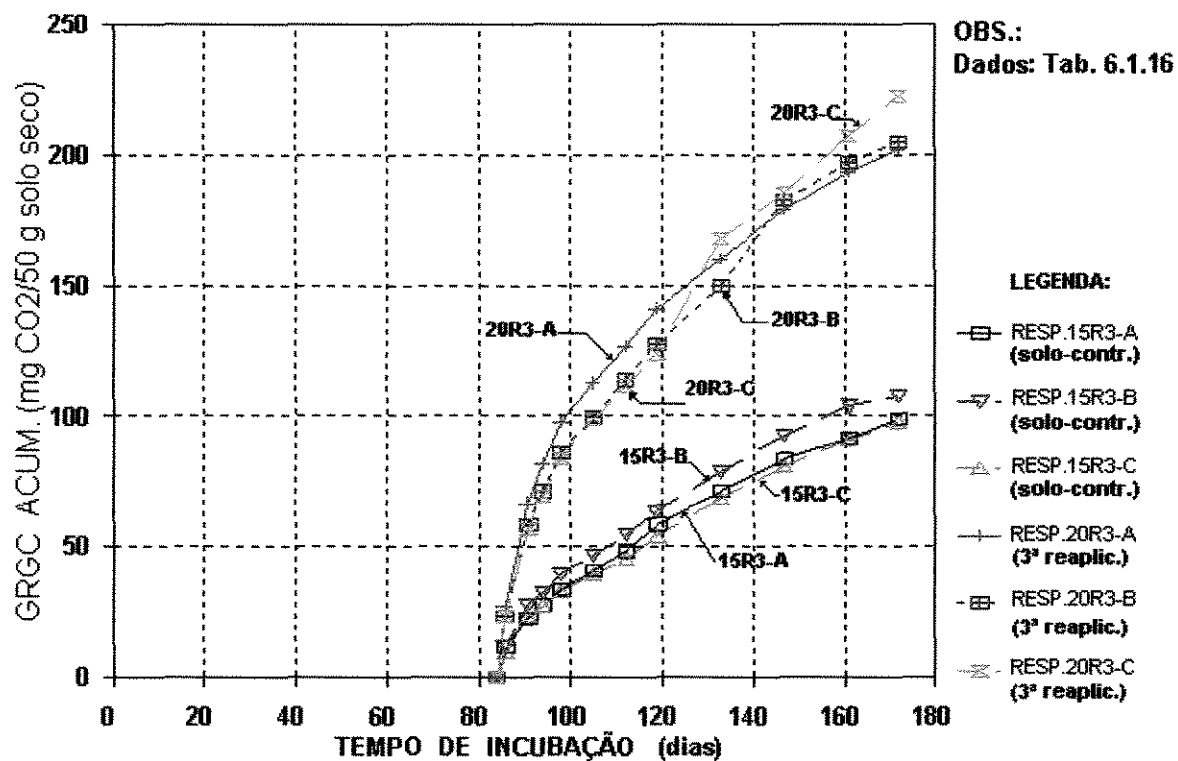


Fig. 6.2.11 - 2ª FASE - CURVAS: GRGC ACUM. x TEMPO
(Respirômetros: 15R3-A, B e C; 20R3-A, B e C)

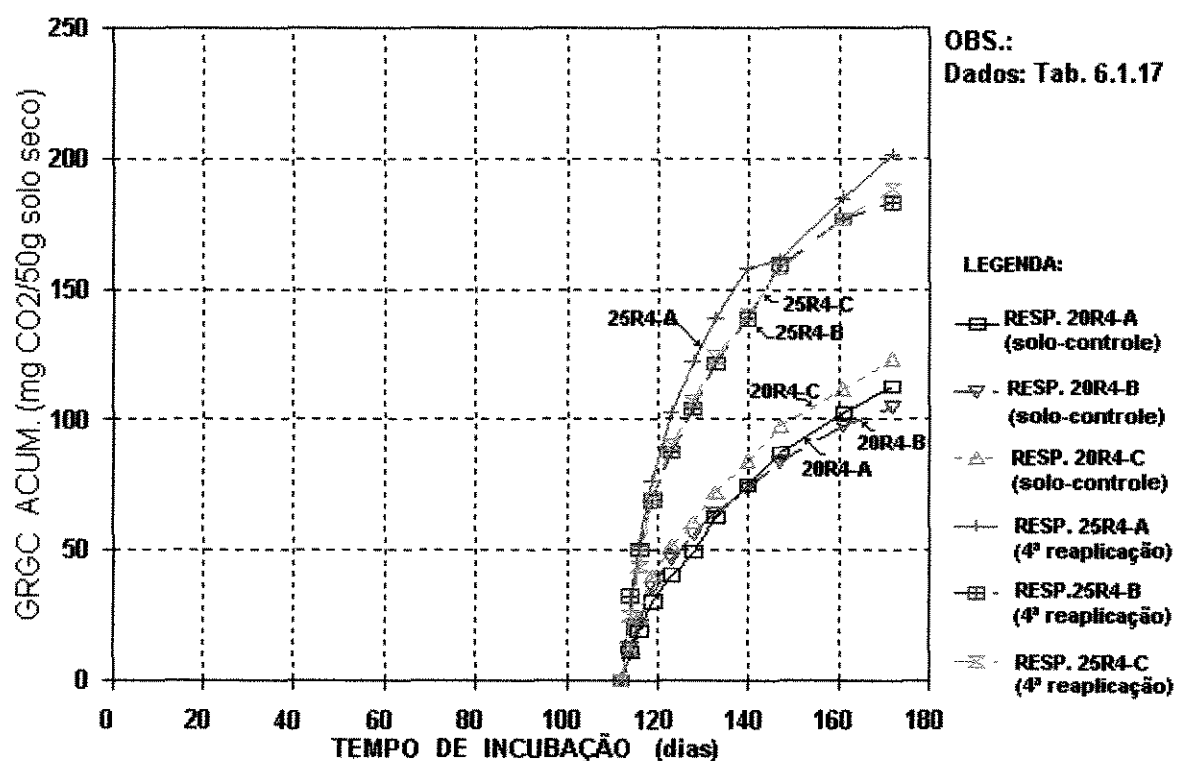


Fig. 6.2.12 - 2ª FASE - CURVAS: GRGC ACUM. x TEMPO
(Respirômetros: 20R4-A, B e C; 25R4-A, B e C)

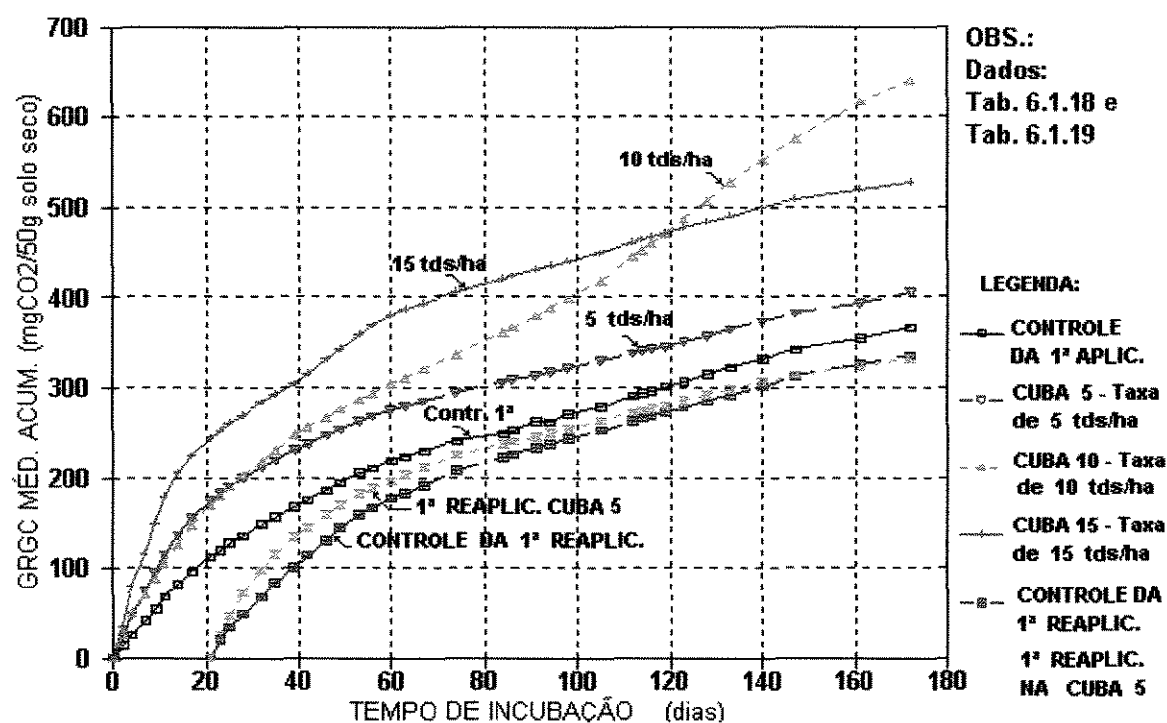


Fig. 6.2.13 - 2ª FASE - CURVAS: GRGC MÉDIA ACUM. x TEMPO
(1ª aplic. de lodo nas cubas: 0, 5, 10 e 15; 1ª reaplic.)

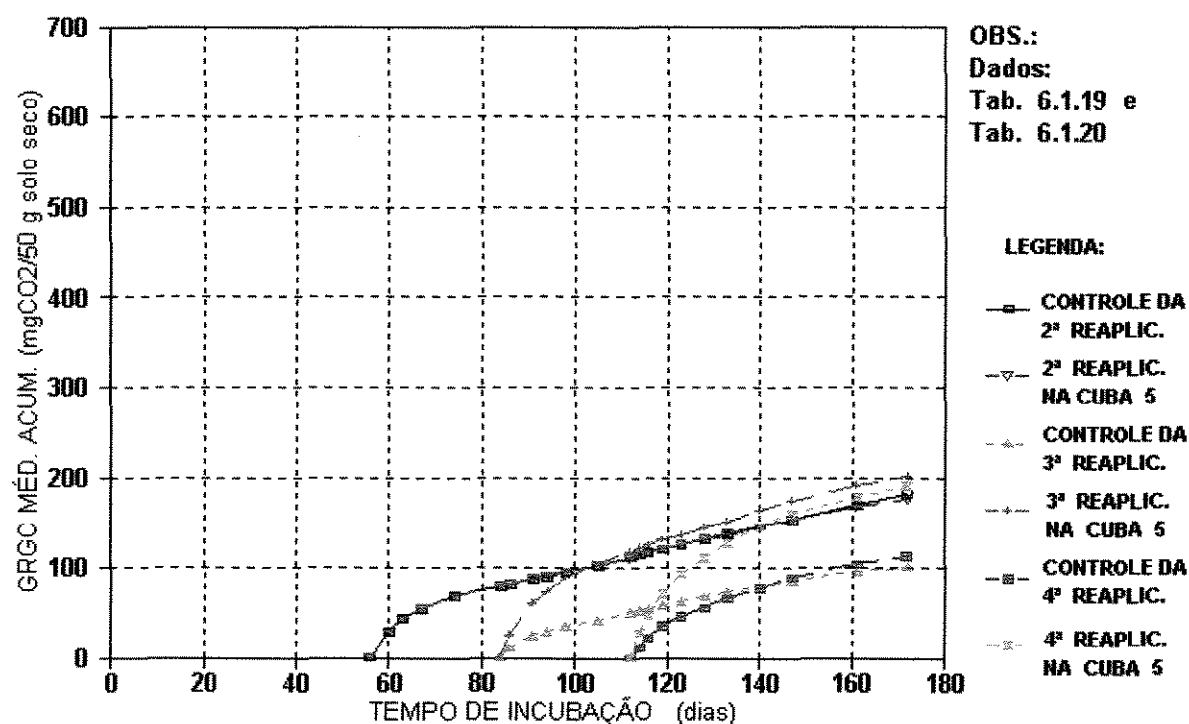


Fig. 6.2.14 - 2ª FASE - CURVAS: GRGC MÉDIA ACUM. x TEMPO
(2ª, 3ª e 4ª reaplicações de lodo na cuba 5)

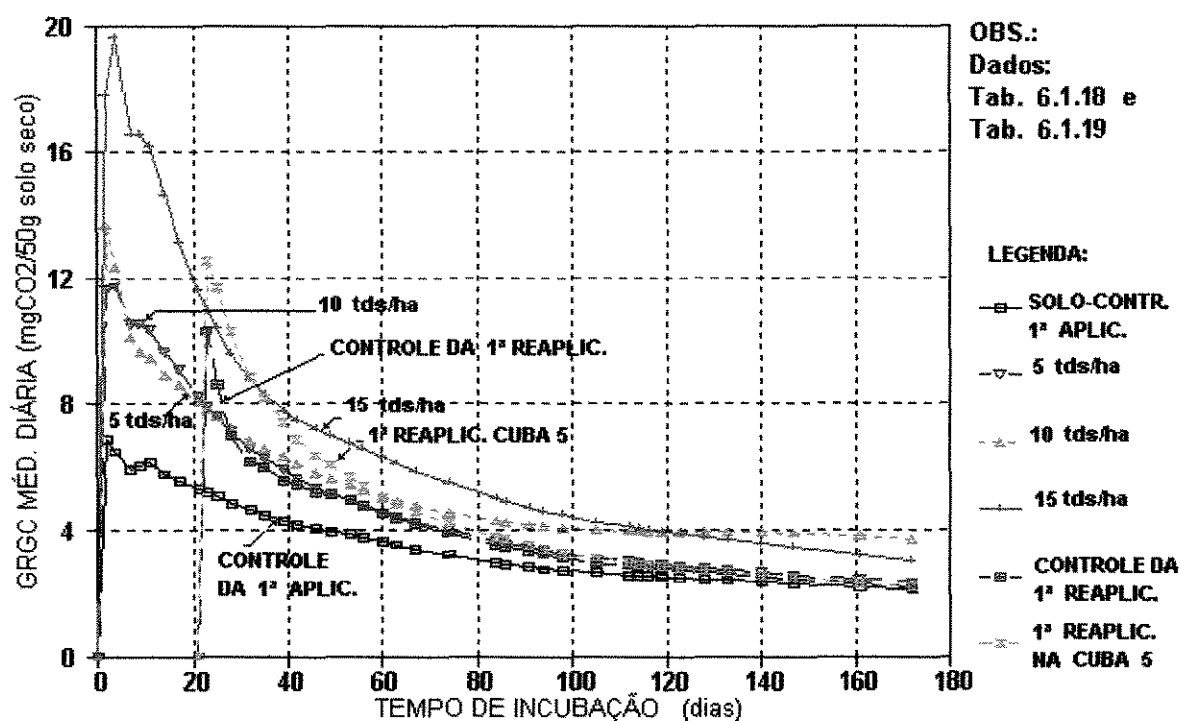


Fig. 6.2.15 - 2ª FASE - CURVAS: GRGC MÉDIAS DIÁRIAS x TEMPO
(1ª aplic. lodo cubas: 5, 10 e 15 e 1ª reaplic. cuba 5)

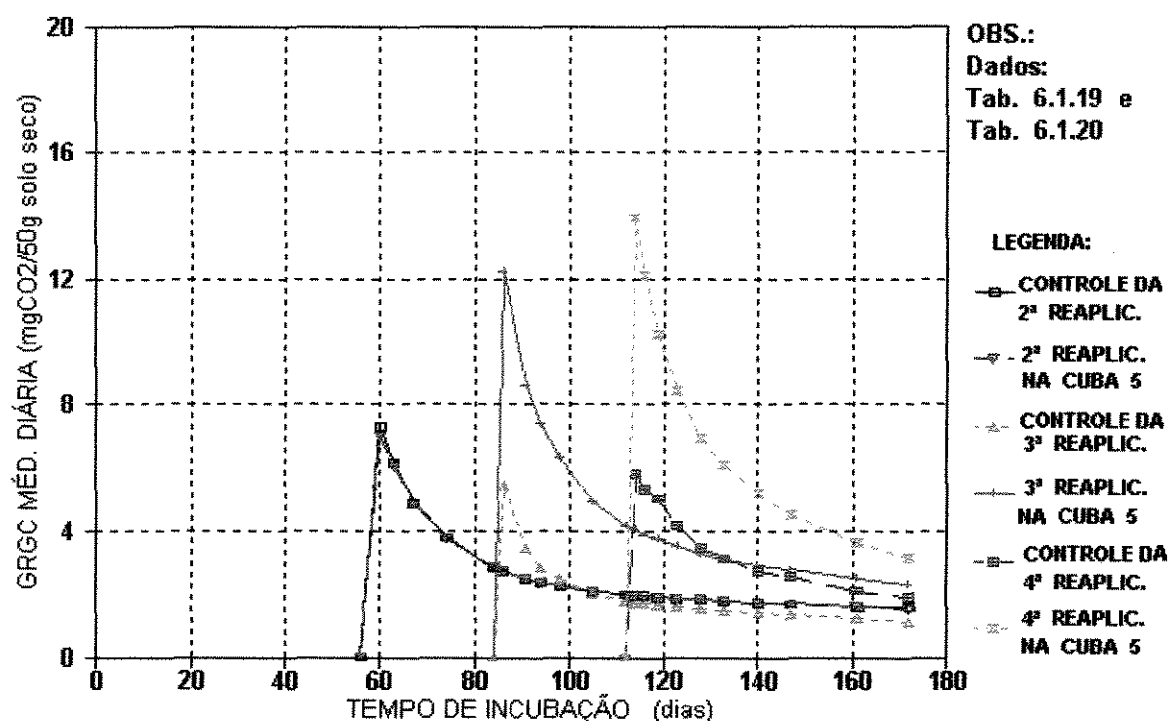


Fig. 6.2.16 - 2ª FASE - CURVAS: GRGC MÉDIAS DIÁRIAS x TEMPO
(2ª, 3ª e 4ª reaplicações de lodo na cuba 5)

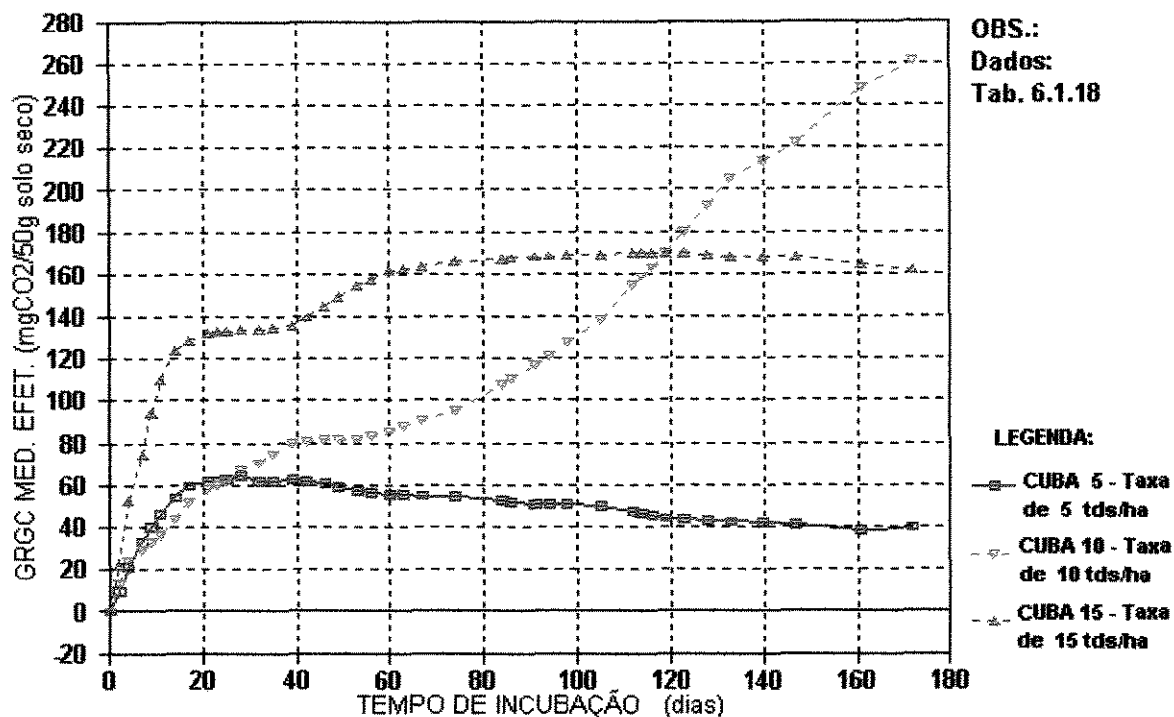


Fig. 6.2.17 - 2ª FASE - CURVAS: GRGC MÉDIA EFETIVA x TEMPO
(1ª aplicação de lodo nas cubas: 5, 10 e 15)

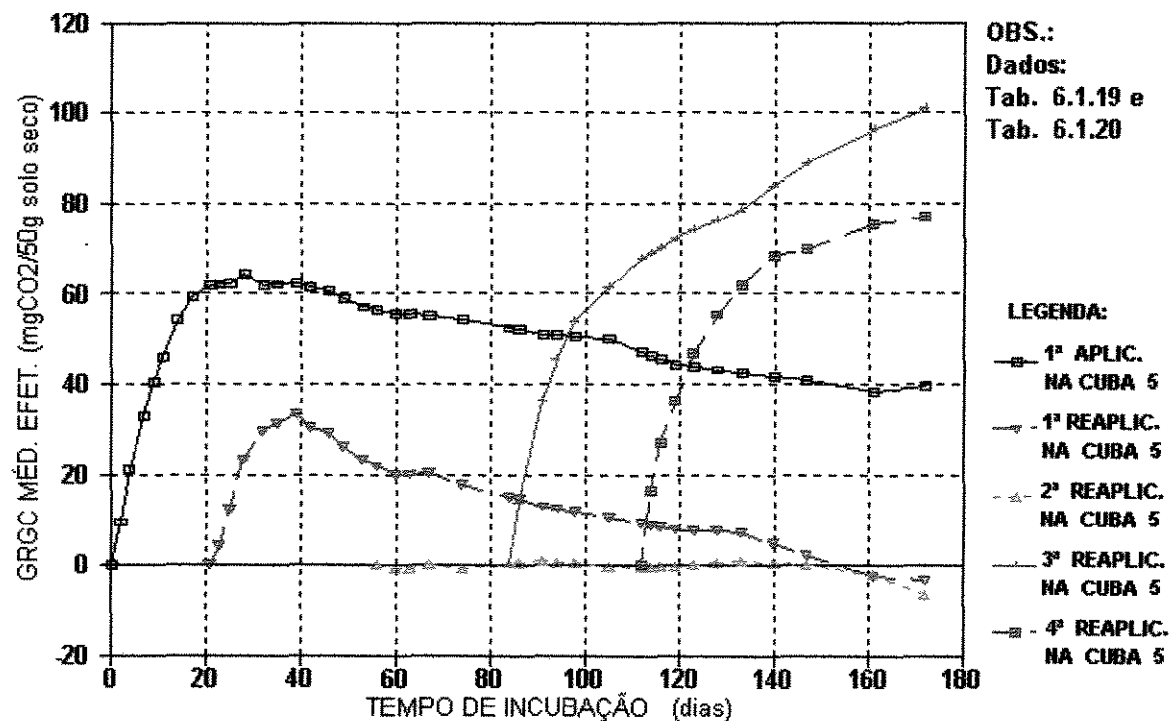


Fig. 6.2.18 - 2ª FASE - CURVAS: GRGC MÉDIA EFETIVA x TEMPO
(1ª aplic.; 1ª, 2ª, 3ª e 4ª reaplic. de lodo na cuba 5)

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de Norma 01:603.06-007 (no prelo). Determinação da Biodegradação em Solos - Método Respirométrico. Jan. 1993;

____ NBR-10.004 - Resíduos Sólidos - Classificação. 1987;

AKTER, M.S. Trace Metal Analysis of Sewage Sludge and Soils in Bahrain. In: Wat. Air and Soil Poll. v.51, n.1-2, p.147-152, 1990;

ALEXANDER, M. Introduction to Soil. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1961. 467p.;

ALMEIDA, S.A.S. e MUJERIEGO, R. Lodo de esgoto - Processos e Equipamentos Disponíveis no Brasil para Secagem Mecânica In: Revista Construção Pesada. n. 83, p.90-97, dez 1977;

ANGLIAN WATER. Manual of Good Practice for Utilization of Sewage Sludge in Agriculture 2nd Rev. United Kingdom oct. 1991, 53p.;

APHA - American Public Health Association Standard Methods for Examination of Water and Wastewater GREENBERG, A.E, CLESCERI, L.S. e EATON, A.D. (ed.) 18ª ed. Washington. 1989.

- AZEVEDO NETTO, J.M. e HESS, M.L.** Tratamento de Águas Residuárias Separata da Revista DAE. 1970. 218p.;
- AZEVEDO NETTO, J.M.** Cronologia do Abastecimento de Água (até 1970) In: Revista DAE v.44, n.137, p.106-111, jun. 1984;
- BALMER, P. e KAFFEHR, B.** Differential Thermal Analysis for the Characterization on the Stability of Sludge. In: L'HERMITE, P. (ed.) Characterization, Treatment and Use of sewage sludge. Dordrecht-Holland: D.Reidel, 1983. p.44-54;
- BARTHA, R. e PRAMER, D.** Features of a flask and Method for Measuring the Persistence and Biological Effects of Pesticides in Soil. In: Soil Science V.100, n. 1, p.68-70, 1965;
- BERTOLDI, M., VALLINI, G. e PERA, A.** Technological Aspects of Composting Including Modelling and Microbiology. In: GASSER, J.K.R. (ed). Composting of agricultural and other wastes U.K.: Galliards, mar 1984. p.27-41;
- BOSSERT, I. e BARTHA, R.** The fate of Petroleum in Soil Ecosystems. In: ATLAS, R. M. (ed.) Petroleum Microbiology. New York: Macmillan, Inc., pp-435-577, 1984;
- BROSCH, C.D., ALVARINHO, S.B. e SOUZA, H.R.** Produção de Agregado Leve a partir de Lodo de Esgoto. In: Revista DAE n. 104, p.53-58, 1976;
- BROWN, R. E.** Significance of Trace Metals and Nitrates in Sludge Soils. In: Journal WPCF v.47, n.12, p.2863-2875, dec. 1975;

BRUCE, A.M. e FISHER, W.J. Sludge Stabilisation - Methods and Measurement. In: Bruce A. (ed). Sewage Sludge Stabilisation and Desinfection. Ellis Horwood Series in Water and Wastewater Technology. **1984**;

BUCKMAN, H.O. e BRADY, N.C. The Nature and Properties of Soils New York: Mac Millan, **1964**. 576p. apud MEDINA, H.P. Constituição física. In: MONIZ, A.C. (ed.) Elementos de Pedologia. 2.ed. Rio de Janeiro: LITEC, **1975**. Cap.1 p.11-57;

CAMARGO, O.A, MONIZ, A.C, JORGE, J.A e VALADARES, J.M.A.S. Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas, Instituto Agrônomo, Boletim Técnico nº 106. **1986**. 94p.;

CASARINI, D.C.P., MACEDO, R.M., CUNHA, R.C. de A. e MAUGER J.C.O. The Development of Assessment Techniques to Evaluate the Biodegradation of Oily Sludge in a Landfarm System. In: Wat. Sci. Tech. v.20, n.10, p.231-236, **1988**;

CASARINI, D.C.P. Informações Pessoais. **1994**;

CERRI, C.C., ANDREUX, F. e EDUARDO, B.P. O Ciclo do Carbono no Solo In: CARDOSO, E.J.B.N. (ed.) Microbiologia do Solo, Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo **1992**. Cap.6. p.73-90;

CETESB - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. Norma L.6350 - Solos - Determinação da Biodegradação de Resíduos - Método Respirométrico de Bartha - Método de Ensaio São Paulo. **1990**;

_____. Tratamento de Resíduos Industriais no Solo - Sistemas Landfarming. São Paulo **1991** (datilografado);

- CORAUCCI FILHO, B.** Tratamento de Esgotos Domésticos no Solo pelo Método do Escoamento Superficial. USP. 1991. vol.I 400p. Tese (doutorado - Escola Politécnica da USP). **1991**;
- COUILLARD, D. e SHUCAI, Z.** Bacterial Leaching of Heavy Metals from Sewage Sludge for Agricultural Application. In: Wat. Air and Soil Poll. v.23, n.1-2, p.67-80, may **1992**;
- DER** - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo - Método de Análise M6-61 - Análise Granulométrica de Solos por Peneiração e Sedimentação (processo do densímetro). **1974**;
- DI BERNARDO, L.** Coagulação - Floculação. Escola de Engenharia de São Carlos. datilografado 129p. [s.d.];
- DINIZ, S., POITEVIN, F.B. e MALTESE, H.** Dicionário Médico In: Enciclopédia Médica da Família. Rio de Janeiro: Melhoramentos/Maltese, **1977**. Vol.4;
- DUDKA, S. e CHLOPECKA, A.** Effect of Solid-phase Speciation on Metal Mobility and Phytoavailability in Sludge-amended Soil. In: Wat. Air and Soil Poll. v.51, n.1-2, p.153-160. **1990**;
- EMMERICH, W.E., LUND, L.J., PAGE, A.L. e CHANG, A.C.** Movement of Heavy Metals in Sewage Sludge-treated Soils. In: J. Env. Qual. v.11, n.2, p.174-178, **1982**;
- FULLER, W.H. e WARRICK, A.W.** Soils in Waste Treatment and Utilisation, Boca Raton - Florida: CRC-PRESS, **1985**. 2v.;

- GODFREE, A.F., JONES, F., SATCHWELL, M. e WATSON, D.C.** The Effectiveness of Chemical Disinfection on Faecal Bacteria in Sludge. In: Bruce A. (ed), Sewage Sludge Stabilisation and Disinfection, Chichester U.K.: 1984. p.412-425;
- GONDIM, J.C.C.** Valos de Oxidação Aplicados a Esgotos Domésticos. São Paulo: CETESB, 1976. 137p.;
- GROHMANN, F.** Estrutura In: MONIZ, A.C. (ed.) Elementos de Pedologia. 2.ed. Rio de Janeiro: LITEC, 1975. Cap.9, p.101-122;
- GROVE, G.W.** Use Land Farming for Oily Waste Disposal. In: Hydroc. Process. p.138-140 may. 1978;
- HAMER, G. e ZWIEFELHOFER, H.P.** Aerobic Thermophilic Hygienization - A Supplement to Anaerobic Mesophilic Waste Sludge Digestion In: EFCE-HPC, Efluent Treatment and Disposal. Rugby-U.K.: Pergamon Press, 1986. p.163-180;
- HARTENSTEIN, R.** Sludge Decomposition and Stabilization. In: SCIENCE v.212, n.4496, p.743-749, may 1981;
- HEMPHILL, B.** Rules and Options for Sludge Disposal In: Water Engineering and Management v.139, n.2, p.24-26, feb. 1992;
- HUNT, K.; BROWN, D.; GADDIS, L. e RATZKI, T.** When your back is against the Ceiling: Springfield Ohio Works towards compliance with the 40 CFR 503 Regulations. In: The Management of Water and Wastewater Solids for the 21st Century: A Global Perspective, jun. 1994 Washington, D.C. USA: Water Environment Federation, 1994. p.14-29 a 14-39;

IAC - Instituto Agrônômico de Campinas - Determinação do N inorgânico (NH_4^+ e NO_3^+) em solo, pelo método da destilação a vapor HC-SFSNP - 1992 (datilografado);

_____ Determinação do índice de disponibilidade de nitrogênio, pelo método do KCl a quente ($\text{N} - \text{NH}_4^+$). HC-SFSNP - 1992 (datilografado);

JORGE, J.A. Matéria Orgânica In: **MONIZ, A.C.** (ed.) Elementos de Pedologia. 2.ed. Rio de Janeiro: LITEC, 1975. Cap.13, p.170-177;

KAMIYAMA, H. Lodo Ativado por Batelada (LAB): Suas Vantagens no Tratamento de Esgotos das Comunidades de Médio e Pequeno Porte (Parte 1). In: Revista DAE-SABESP n.157, p.218-221, out-dez 1989;

_____ Lodo Ativado por Batelada (LAB): Suas Vantagens no Tratamento de Esgotos das Comunidades de Médio e Pequeno Porte. Parte 2. In: Revista DAE-SABESP n.159, p.1-4, set-out. 1990.

_____ Lodo Ativado por Batelada: Um Processo Econômico para o Tratamento de Esgotos em Estações de Grande Porte In: Revista DAE-SABESP n.165, p.1-7, mai-jun 1992;

KHRAMENKOV, S.V., Practice of Wastewater Sludge - Utilization in the City of Moscow. In: Efluent Treatment and Waste Disposal. ICE, 1990. p.331-338;

LAMY, I., BOURGEOIS, S., BERMOND, A. Soil Cadmium Mobility as a Consequence of Sewage Sludge Disposal. In: J. Env. Qual. v.22, n.4, p.731-737, 1993;

LOWE, P. The Development of a Sludge Disposal Strategy for the Hong Kong Territories. In: J. IWEM n.7, p.351-353, aug. 1993;

MATTHEWS, P. J. Sewage Sludge Disposal in the UK: A New Challenge for the Next Twenty Years In: J. IWEM n.6, p.551-559, oct. **1992**;

_____ Land Application of Sewage Sludge - The Latest U.K. Perspective. International Symposium on Land Application of Organics (ISOLAO), Tokyo, Japan Jul. **1995**;

MEDINA, H.P. Constituição Física, Classificação Textural e Água no Solo. In: **MONIZ, A.C. (ed.)** Elementos de Pedologia. 2.ed. Rio de Janeiro: LITEC, **1975**. Cap.1, 2 e 4 p.11-28 e 45-57;

METCALF, L. e EDDY, H.P. Tratamiento y Depuración de las Águas Residuales. Tradução de Wastewater Engineering: Collection, Treatment and Disposal, Barcelona-Espanha: Labor, **1977**. 837p.;

_____ Wastewater Engineering - Treatment, Disposal and Reuse, 3ª ed. Tchobanoglous, G (ed.), Singapore, Mc. Graw Hill, **1991**. 1.334p.;

MOREL, J.L. e GUCKERT, A. Influence of Limed Sludge on Soil Organic Matter and Soil Physical Properties. In: **CATROUX, G. (ed.)** The Influence of Sewage Sludge Application on Physical and Biological Properties of Soils. Dordrecht-Holland: D. Reidel, **1983**. p.25-42;

NOGUCHI, H. e ITO, H. Long-term Experiment of Applying Sludge Fertilizer to Agricultural Land. In: J. of Inst. of Wat. and Env. Manag. v.6,n.5, p.576-582, oct **1992**;

NOWAKOWSKI, D. e ZITRIDES, T.G. Extending the Range of Microbial Respirometry. In: Poll.Eng. v.24, n.9, p.52-56, may **1992**;

PALAZZO, A.J. e REYNOLDS, C.M. Long Term Changes in Soil and Plant Metal Concentrations in an Acidic Dredge Disposal Site Receiving Sewage Sludge In: Wat. Air and Soil Poll. v.57-58, p.839-848, aug. 1991;

PETROBRÁS/DITER/SEBIO - Procedimentos para Monitoramento e Avaliação do Tratamento de Resíduos Sólidos pelo Processo de Landfarming Comunicação Técnica nº 50/91 - jul. 1991 (datilografado);

PIKE, E.B. e DAVIS, R.D. Chap. 3 - Stabilisation and Disinfection - Their Relevance to Agricultural Utilisation of Sludge. In: Bruce A., Sewage Sludge Stabilisation and Disinfection. Chichester U.K.: 1984. p.61-91;

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S. e BATAGLIA, O.C. Análise Química do Solo para fins de Fertilidade, Fundação Cargill, Campinas, 1987 170p.;

REICHARDT, K. Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera. 4ª ed. Campinas: Fundação CARGILL, 1985. 466p.;

REILLY, W.J., COLLIER, P.W. e FORBES, G.I. Cysticercus Bovis Surveillance - an Interim Report. Communicable Disease Scotland. 30 may (CDS 81/22), p.vii. 1981. apud PIKE, E.B., DAVIS, R.D. Stabilisation and Disinfection - Their Relevance to Agricultural Utilisation of Sludge. In: Bruce A. (ed) Sewage Sludge Stabilisation and Disinfection. Chichester U.K.: 1984. p.61-91;

ROCCA, A.C.C. et al. Resíduos Sólidos Industriais 2.ed. São Paulo: CETESB, 1993. 233p.;

- USEPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USA).** Process Design Manual - Land Application of Municipal Sludge. Cincinnati OH-45268 - EPA - 625/1-83.016. Oct. **1983**;
- _____ Test Methods for Evaluating Solid Waste 3ª ed. vol. I - Sec. A. Rev. 0 - SW-846 - Sept. **1986**;
- _____ Review of EPA Sewage Sludge Technical Regulations In: Journal WPCF v.61, n.7, p.1206-1213, july. **1989**;
- _____ CFR - 40 - PART 503 - Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge - Federal Register v.58 **1993**;
- VARGAS, M.** Introdução à Mecânica dos Solos. São Paulo: Mc Graw Hill, **1977**. 509p.;
- VISSMAN Jr., W. e HAMMER, M.J.** Chap. 13 - Processing of Sludges In: Water Supply and Pollution Control. 4ª ed. N.Y.: Harper & Row, **1985**. p.609-661;
- VINCENT, A.J. e CRITCHLEY, R.F.** A Review of Sewage Sludge Treatment and Disposal in Europe. In: BRUCE, A. (ed.) Sewage Sludge Stabilisation and Disinfection. Chichester U.K.: **1984**. p.550-580;
- WATSON, D.C.** The Survival of Salmonellae in Sewage Sludge Applied to Arable Land. In: Wat. Poll. Contr. v.79, n.1, p.11-18, **1980**;
- WILLIAMS, S.E. e WOLLUN, A.G.** Effect of Cadmium on Soil Bacteria and Actinomycetes. In: J. Env. Qual. v.10, n.2, p.142-144, **1981**;
- WUTKE, A.C.P. e CAMARGO, O.A.** Adsorção e Troca Iônica In: MONIZ, A.C. (ed.) Elementos de Pedologia. 2.ed. Rio de Janeiro: LITEC, **1975**. Cap.11, p.125-146.