



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru



**TRATAMENTO DE CHORUME ATRAVÉS DE PERCOLAÇÃO EM
SOLOS EMPREGADOS COMO MATERIAL DE COBERTURA DE
ATERROS PARA RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

CRISTIANO KENJI IWAI

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial

BAURU - SP
Janeiro, 2005



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia
Campus de Bauru



**TRATAMENTO DE CHORUME ATRAVÉS DE PERCOLAÇÃO EM
SOLOS EMPREGADOS COMO MATERIAL DE COBERTURA DE
ATERROS PARA RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

CRISTIANO KENJI IWAI

Orientador: Prof. Dr. Jorge Hamada

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial

BAURU - SP
Janeiro, 2005

À minha mãe Sueli, minha noiva Débora e minhas
irmãs Yuri e Sayuri pelo apoio, amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Hamada pelo grande incentivo, dedicação, amizade e contribuição ao trabalho.

Ao técnico do DAE – Departamento de Água e Esgotos de Bauru, Gilberto Sebastião Castilho Filho, pelo grande incentivo e importante contribuição nas análises químicas envolvidas no trabalho.

Ao Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti, ao Prof. Dr. Jorge Akutsu e ao Prof. Dr. Valdir Schalch, pela importante contribuição e grande incentivo.

À todos os docentes e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial da Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Bauru, que ajudaram em minha formação.

À todos os meus companheiros de trabalho da CETESB – Agência Ambiental de Mogi das Cruzes, pela contribuição em meu aprendizado profissional, e pelo grande incentivo.

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	3
1 INTRODUÇÃO	5
2 OBJETIVOS	7
3 REVISÃO DE LITERATURA	8
3.1 RESÍDUOS	8
3.1.1 CLASSIFICAÇÃO	8
3.1.2 COMPOSIÇÃO	9
3.1.3 PROPRIEDADES	12
3.1.4 TIPOS DE DISPOSIÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS	20
3.2 ATERRO SANITÁRIO	21
3.2.1 Definições	21
3.2.2 Classificação	24
3.2.2.1 Quanto ao Tipo	24
3.2.2.2 Quanto aos Métodos	25
3.3 CHORUME	27
3.3.1 QUALIDADE	27
3.3.1.1 Parâmetros de Qualidade do Chorume	27
3.3.1.2 Variações na Qualidade do Chorume	31
3.3.2 GERAÇÃO	35
3.3.3 TRATAMENTO DE CHORUME	39
3.3.3.1 Tratamento Biológico	42
3.3.3.2 Tratamento Físico e Químico	48
3.3.3.3 Estratégia para Tratamento do Chorume	50
3.4 UTILIZAÇÃO DO SOLO COMO ELEMENTO DEPURADOR	52
3.4.1 Método de infiltração	54
3.4.2 Percolação	55
3.5 ATENUAÇÃO NATURAL	55
3.5.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	55
3.5.2 PROCESSOS DE ATENUAÇÃO	57
3.5.3 MECANISMOS DE ATENUAÇÃO	57
3.5.3.1 Mecanismos Físicos	58

3.5.3.2	Mecanismos Químicos (segundo McBean et al, 1995, Qasin et al, 1994, e Bagchi, 1994)	59
3.5.3.3	Mecanismos Microbiológicos (segundo Qasin et al, 1994)	60
3.5.4	TESTES DE PERCOLAÇÃO EM COLUNAS	61
4	MATERIAIS E MÉTODOS	64
4.1	CONCEPÇÃO DAS COLUNAS DE PERCOLAÇÃO	65
4.2	SOLO ESTUDADO	67
4.2.1	DESCRIÇÃO DA GEOLOGIA DA REGIÃO	67
4.2.2	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO TÍPICO DESSA REGIÃO	68
4.2.3	LOCAL DE AMOSTRAGEM DE SOLO	68
4.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO, COMPACTAÇÃO E PERMEABILIDADE NO SOLO ESTUDADO	70
4.4	MONTAGEM DAS COLUNAS DE PERCOLAÇÃO	74
4.5	AMOSTRAGEM, PRESERVAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CHORUME	76
4.6	ALIMENTAÇÃO DAS COLUNAS DE PERCOLAÇÃO	80
4.7	ANÁLISES QUÍMICAS	82
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
5.1	PRIMEIRA CAMPANHA DE ENSAIOS	85
5.2	SEGUNDA CAMPANHA DE ENSAIOS	100
5.3	TERCEIRA CAMPANHA DE ENSAIOS	135
5.4	RELAÇÃO DE SOLO NECESSÁRIO PARA COBERTURA E CHORUME GERADO, EM UM ATERRO SANITÁRIO	148
5.4.1	ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE LIXO A SER DISPOSTO	149
5.4.2	VIDA ÚTIL DO ATERRO E DEMANDA DE SOLO PARA COBERTURA	151
5.4.3	GERAÇÃO DE CHORUME	152
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	154
6	CONCLUSÕES	156
7	SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE	158
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	159
9	ANEXOS	165
8.1	PRIMEIRA CAMPANHA DE ENSAIOS	165
8.2	SEGUNDA CAMPANHA DE ENSAIOS	168
8.3	TERCEIRA CAMPANHA DE ENSAIOS	195

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1:	Distribuição típica para composição gravimétrica dos resíduos sólidos domésticos em função do estágio de desenvolvimento do país (Tchobanoglous, <i>et al</i> 1993).	10
Tabela 3-2:	Composição Gravimétrica dos resíduos sólidos domésticos de Caxias do Sul - RS. (Pessin <i>et al</i> , 1991).	11
Tabela 3-3:	Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domésticos do município de São Carlos – SP e respectiva biodegradabilidade. (Gomes, <i>apud</i> Pinto <i>et al.</i> , 2000).	11
Tabela 3-4:	Composição Gravimétrica do Lixo Domiciliar em dois municípios da região metropolitana de Salvador. (CONDER, 1992)	12
Tabela 3-5:	Massa específica e umidade dos resíduos domiciliares, comerciais, industriais e agrícolas (Tchobanoglous <i>et al</i> , 1993).	13
Tabela 3-6:	Dados típicos da composição de componentes dos resíduos sólidos domiciliares.	15
Tabela 3-7:	Dados típicos da composição de componentes dos resíduos domiciliares, comerciais e industriais.	16
Tabela 3-8:	Dados típicos aproximados de conteúdo e energia para materiais encontrados em resíduos sólidos urbanos.	17
Tabela 3-9:	Dados de fração biodegradável de alguns resíduos orgânicos, baseados no conteúdo de lignina calculados por Chandler, <i>et al</i> (1980).	18
Tabela 3-10:	Fases de desenvolvimento de moscas domésticas (Salvato, 1992)	20
Tabela 3-11:	Dados típicos da composição do chorume para aterros novos e antigos segundo Tchobanoglous, 1993).	28
Tabela 3-12:	Processos representativos para tratamento de águas residuárias, inclusive o chorume, baseado em Metcalf & Eddy (1991).	41
Tabela 3-13:	Processos de tratamento para os principais constituintes do chorume (McBean <i>et al</i> , 1995).	42
Tabela 3-14:	Resultados do tratamento de chorume em lagoas aeradas (escala piloto)	44
Tabela 3-15:	Exemplos de eficiência de tratamento empregando reatores de filme fixo (McBean <i>et al</i> , 1995).	46
Tabela 3-16:	Resumo de levantamentos realizados por Lema <i>et al</i> (1988), para alguns sistemas anaeróbios de tratamento de chorume.	47
Tabela 3-17:	Volume das colunas empregadas dos testes de percolação para diversos autores com diferentes materiais, segundo Leite (2000).	62
Tabela 4-1:	Índices físicos e coeficiente de permeabilidade do solo na condição natural.	70
Tabela 4-2:	Resultados do ensaios de compactação e permeabilidade com ajuste exponencial de curva.	72
Tabela 4-3:	Caracterização do chorume utilizado na primeira campanha de ensaios.	78
Tabela 4-4:	Caracterização do chorume utilizado na segunda campanha de ensaios – primeira etapa.	79

Tabela 4-5:	Caracterização do chorume utilizado na segunda campanha de ensaios – terceira etapa.	79
Tabela 4-6:	Caracterização do chorume utilizado na terceira campanha de ensaios.	80
Tabela 5-1:	Características das colunas de percolação na primeira campanha de ensaios.	85
Tabela 5-2:	Resultados da análise de solubilização do solo utilizado nas colunas de percolação, após a segunda campanha de ensaios.	134
Tabela 5-3:	Concentração de Metais (Cd, Pb e Zn) na água utilizada no abastecimento das colunas (mg/l)	143
Tabela 5-4:	Concentração de Cádmio no efluente das colunas abastecidas com água (mg/l)	143
Tabela 5-5:	Concentração de Chumbo no efluente das colunas abastecidas com água (mg/l)	143
Tabela 5-6:	Concentração de Zinco no efluente das colunas abastecidas com água (mg/l)	143
Tabela 5-7:	Censos demográficos para o município considerado (SEADE, 2002)	149
Tabela 5-8:	Parâmetros adotados para estimativa da quantidade de lixo a ser disposta no aterro.	150
Tabela 5-9:	Quantidade de lixo gerado e respectivo volume a ser ocupado em um aterro sanitário.	150
Tabela 5-10:	Capacidade volumétrica das camadas e vida útil do sistema.	151
Tabela 5-11:	Balanço hídrico da camada de cobertura para o aterro sanitário considerado.	153
Tabela 5-12:	Volume de percolado (chorume) gerado pelo aterro ao longo da vida útil. Estimativa com base nos valores médios mensais dos últimos dez anos.	154
Tabela 9-1:	Resumo dos valores referentes DQO na primeira campanha de ensaios	166
Tabela 9-2:	Valores do pH para as amostras coletadas dos efluentes das colunas.	167
Tabela 9-3:	Valores da Condutividade ($\mu\text{s/cm}$) $T=32^{\circ}\text{C}$, para as amostras coletadas dos efluentes das colunas.	167
Tabela 9-4:	Valores de Cor (UC*) para as amostras coletadas dos efluentes das colunas.	167
Tabela 9-5:	Valores de Turbidez (UT*) para as amostras coletadas dos efluentes das colunas.	168
Tabela 9-6:	Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l), para as amostras coletadas dos efluentes das colunas.	168
Tabela 9-7:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (1 ^a etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 1, com densidade igual a 1,15, em condições saturadas.	170
Tabela 9-8:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (1 ^a etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 2, com densidade igual a 1,30, em condições saturadas.	171
Tabela 9-9:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (1 ^a etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 3, com densidade igual a 1,15.	172
Tabela 9-10:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (1 ^a etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 4, com densidade igual a 1,30.	173
Tabela 9-11:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (1 ^a etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 5, com densidade igual a 1,50	174
Tabela 9-12:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (1 ^a etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 6, com densidade igual a 1,67.	175

Tabela 9-13:	Valores de Cor (UC*) para as amostras coletadas dos efluentes das colunas.	176
Tabela 9-14:	Valores de Turbidez (UT*) para as amostras coletadas dos efluentes das colunas.	177
Tabela 9-15:	Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l)	177
Tabela 9-16:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (2ª etapa – abastecimento com água), para a coluna 1, com densidade igual a 1,15, em condições saturadas.	179
Tabela 9-17:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (2ª etapa – abastecimento com água), para a coluna 2, com densidade igual a 1,30, em condições saturadas.	180
Tabela 9-18:	Resumo dos valores referentes à segunda campanha de ensaios (2ª etapa – abastecimento com água), para a coluna 3, com densidade igual a 1,15.	181
Tabela 9-19:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (2ª etapa – abastecimento com água), para a coluna 4, com densidade igual a 1,30.	182
Tabela 9-20:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (2ª etapa – abastecimento com água), para a coluna 5, com densidade igual a 1,50	183
Tabela 9-21:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (2ª etapa – abastecimento com água), para a coluna 6, com densidade igual a 1,67.	184
Tabela 9-22:	Valores do pH para as amostras coletadas.	185
Tabela 9-23:	Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^\circ\text{C}$, para as amostras coletadas.	185
Tabela 9-24:	Cor (PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart)	186
Tabela 9-25:	Turbidez (FAU - Formazin Attenuation Units).	187
Tabela 9-26:	Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l).	187
Tabela 9-27:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (3ª etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 1, com densidade igual a 1,15, em condições saturadas.	189
Tabela 9-28:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (3ª etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 3, com densidade igual a 1,15.	190
Tabela 9-29:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (3ª etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 4, com densidade igual a 1,30.	191
Tabela 9-30:	Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (3ª etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 5, com densidade igual a 1,50	192
Tabela 9-31:	Valores do pH para as amostras dos efluentes coletados	193
Tabela 9-32:	Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^\circ\text{C}$, para as amostras coletadas	194
Tabela 9-33:	Cor (PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart)	194
Tabela 9-34:	Turbidez (FAU - Formazin Attenuation Units).	195
Tabela 9-35:	Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l)	195
Tabela 9-36:	Resumo dos valores referentes à terceira campanha de ensaios (colunas abastecidas com chorume), para a coluna 1, com densidade igual a 1,15.	197
Tabela 9-37:	Resumo dos valores referentes à terceira campanha de ensaios (colunas abastecidas com chorume), para a coluna 3, com densidade igual a 1,30.	198
Tabela 9-38:	Resumo dos valores referentes à terceira campanha de ensaios (colunas abastecidas com chorume), para a coluna 5, com densidade igual a 1,50.	199
Tabela 9-39:	Valores do pH para as amostras coletadas	200

Tabela 9-40:	Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^{\circ}\text{C}$, para as amostras coletadas	200
Tabela 9-41:	Alcalinidade (mgCaCO_3/l)	200
Tabela 9-42:	Redução de Sólidos Totais (%), tendo como referência os Sólidos Totais do chorume utilizado no abastecimento, obtido através da realização de ensaios durante toda a campanha de ensaios, sendo obtida a média de 26.711 mg/l.	200
Tabela 9-43:	Concentração de Metais (Cd, Pb e Zn) no chorume utilizado no abastecimento das colunas (mg/l)	201
Tabela 9-44:	Concentração de Cádmiio no efluente das colunas abastecidas com chorume (mg/l).	201
Tabela 9-45:	Concentração de Chumbo no efluente das colunas abastecidas com chorume (mg/l).	201
Tabela 9-46:	Concentração de Zinco no efluente das colunas abastecidas com chorume (mg/l)	201
Tabela 9-47:	Resumo dos valores referentes à terceira campanha de ensaios (abastecimento com água), para a coluna 2, com densidade igual a 1,15.	202
Tabela 9-48:	Resumo dos valores referentes à terceira campanha de ensaios (abastecimento com água), para a coluna 4, com densidade igual a 1,30.	203
Tabela 9-49:	Resumo dos valores referentes a terceira campanha de ensaios (abastecimento com água), para a coluna 6, com densidade igual a 1,50.	204
Tabela 9-50:	Valores do pH para as amostras coletadas	205
Tabela 9-51:	Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^{\circ}\text{C}$, para as amostras coletadas	205
Tabela 9-52:	Alcalinidade (mgCaCO_3/l)	205
Tabela 9-53:	Sólidos Totais (mg/l) do efluente das colunas, descontando-se os Sólidos Totais da água utilizada no abastecimento das mesmas, obtido através da realização de ensaios da água durante toda a campanha de ensaios, sendo obtida a média de 124 mg/l.	205

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1:	Desenvolvimento e encerramento de um aterro sanitário: (a) escavação e impermeabilização; (b) Disposição de lixo; (c) encerramento do aterro.	23
Figura 3-2:	Esquema conceitual de operações e processos em um aterro sanitário segundo Tchobanoglous <i>et al</i> , 1993.	24
Figura 3-3:	Métodos de disposição: (a) por escavação; (b) ocupação de área; e (c) ocupação de vales (Tchobanoglous <i>et al</i> , 1993).	26
Figura 3-4:	Variações das características do chorume em função do tempo e das fases de degradação e geração de gases (Tchobanoglous, 1993).	31
Figura 3-5:	Variação da concentração de contaminantes do chorume com a idade do lixo. (Lu, Eichenberger e Stearns, 1985 citado por McBean <i>et al</i> , 1995).	32
Figura 3-6:	Valores de DBO ₅ e DQO do chorume ao longo tempo no aterro controlado de Bauru.	34
Figura 3-7:	Registros de precipitação pluviométrica na região do aterro controlado de Bauru no período de amostragens de chorume.	35
Figura 3-8:	Valores de pH do chorume ao longo tempo no aterro controlado de Bauru.	35
Figura 3-9:	Combinação de tratamento aeróbio e anaeróbio (McBean <i>et al</i> , 1995).	48
Figura 3-10:	Seleção de processos para tratamento de chorume (McBean <i>et al</i> , 1995)	51
Figura 3-11:	Permeômetros: (a) Tubo de Shelby; (b) Molde de compactação; (c) Duplo anel; (d) célula triaxial; e (f) Molde de volume variável.	63
Figura 4-1:	Esquema das Colunas de Percolação	66
Figura 4-2:	Localização da área de coleta do solo para preenchimento das colunas (Calças, 2001).	69
Figura 4-3:	Curva Granulométrica obtida para amostra do solo empregado nas colunas (Mondelli e Rodrigues, 2001).	71
Figura 4-4:	Valores do coeficiente de permeabilidade em função da massa específica seca dos corpos de prova, com a curva ajustada exponencialmente.	73
Figura 4-5:	Valores da massa específica seca em função do percentual de compactação em relação ao Proctor Normal, com curva de correlação exponencial.	73
Figura 4-6:	Flanges em "nylon" para conexão entre os segmentos de tubo e para o fundo com placa perfurada e recipiente coletor, para as colunas não saturadas, e base selada, para as colunas em condições saturadas.	74
Figura 4-7:	Colunas preenchidas com solo em diferentes graus de compactação e condições de saturação.	75
Figura 4-8:	Poço de concentração, recalque e recirculação de chorume do aterro de Bauru.	77
Figura 5-1:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições saturadas.	86
Figura 5-2:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30, em condições saturadas.	87
Figura 5-3:	Eficiência de remoção de DQO para alimentação com intermitência semanal, com taxa de aplicação hidráulica média de 0,0193 m ³ /m ³ .dia	88
Figura 5-4:	Carga de DQO removida para alimentação com intermitência semanal, com taxa de aplicação hidráulica média de 0,0193 m ³ /m ³ .dia.	88

Figura 5-5:	Eficiência de remoção de DQO em função do volume aplicado por metro cúbico de solo seco.	89
Figura 5-6:	Valores do pH para as amostras dos efluentes coletados nas colunas em condições saturadas.	90
Figura 5-7:	Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^{\circ}\text{C}$, para as amostras do efluente coletado nas colunas em condições saturadas.	90
Figura 5-8:	Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado nas colunas em condições saturadas (*UC: padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart).	91
Figura 5-9:	Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado nas colunas em condições saturadas (*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).	92
Figura 5-10:	Eficiência na redução de Sólidos Totais para as colunas em condições saturadas. (mg/l).	92
Figura 5-11:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições não saturadas	93
Figura 5-12:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30, em condições não saturadas	94
Figura 5-13:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,50, em condições não saturadas	94
Figura 5-14:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,67, em condições não saturadas	94
Figura 5-15:	Eficiência de remoção de DQO para alimentação com intermitência semanal, com taxa de aplicação hidráulica média de $0,0193 \text{ m}^3/\text{m}^3.\text{dia}$, para as colunas em condições não saturadas.	95
Figura 5-16:	Carga de DQO removida para alimentação com intermitência semanal, com taxa de aplicação hidráulica média de $0,0193 \text{ m}^3/\text{m}^3.\text{dia}$, para as colunas em condições não saturadas.	96
Figura 5-17:	Eficiência de remoção de DQO em função do volume aplicado por metro cúbico de solo seco, para as colunas em condições não saturadas.	96
Figura 5-18:	Valores do pH para as amostras coletadas do efluente das colunas não saturadas.	97
Figura 5-19:	Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^{\circ}\text{C}$, para as amostras coletadas do efluente das colunas não saturadas	98
Figura 5-20:	Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado nas colunas não saturadas (*UC: padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart).	98
Figura 5-21:	Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado das colunas não saturadas (*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).	99
Figura 5-22:	Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l), no efluente das colunas em condições não saturadas.	100
Figura 5-23:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições saturadas.	101
Figura 5-24:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30, em condições saturadas.	102
Figura 5-25:	Eficiência de remoção de DQO para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3\text{chorume}/\text{m}^3\text{SoloSeco}$	102
Figura 5-26:	Carga de DQO removida para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3\text{chorume}/\text{m}^3\text{SoloSeco}$	103

Figura 5-27:	Eficiência de remoção de DQO em função do volume aplicado por metro cúbico de solo seco.	103
Figura 5-28:	Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado (*UC: padrão relativo ao PtCo-Platinum - Cobalt Units Standart).	104
Figura 5-29:	Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado(*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).	104
Figura 5-30:	Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l), no efluente das colunas em condições saturadas.	105
Figura 5-31:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições não saturadas	106
Figura 5-32:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30, em condições não saturadas	106
Figura 5-33:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,50, em condições não saturadas	107
Figura 5-34:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,67, em condições não saturadas	107
Figura 5-35:	Eficiência de remoção de DQO para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de 0,034 m ³ (chorume)/m ³ (solo seco).	108
Figura 5-36:	Carga de DQO removida para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de 0,034 m ³ (chorume)/m ³ (SoloSeco).	109
Figura 5-37:	Eficiência de remoção de DQO em função do volume aplicado por m ³ de solo seco.	109
Figura 5-38:	Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado nas colunas não saturadas (*UC: padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart).	110
Figura 5-39:	Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado das colunas não saturadas (*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).	110
Figura 5-40:	Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l), no efluente das colunas em condições não saturadas.	111
Figura 5-41:	Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições saturadas.	112
Figura 5-42:	Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30, em condições saturadas.	113
Figura 5-43:	DQO efluente, para alimentação diária com água.	113
Figura 5-44:	Carga de DQO efluente para alimentação diária com água.	114
Figura 5-45:	Valores do pH para as amostras dos efluentes coletados.	114
Figura 5-46:	Valores da Condutividade (µs/cm) T=32°C, para as amostras coletadas	115
Figura 5-47:	Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado nas colunas saturadas (*UC: padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart).	115
Figura 5-48:	Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado das colunas saturadas (*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).	116
Figura 5-49:	Sólidos Totais (mg/l), no efluente das colunas em condições saturadas.	116
Figura 5-50:	Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições não saturadas	117
Figura 5-51:	Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30, em condições não saturadas	117

Figura 5-52:	Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,50, em condições não saturadas	118
Figura 5-53:	Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,67, em condições não saturadas	118
Figura 5-54:	DQO efluente, para alimentação diária com água.	119
Figura 5-55:	Carga de DQO efluente para alimentação diária com água.	119
Figura 5-56:	Valores do pH para as amostras dos efluentes coletados.	120
Figura 5-57:	Valores da Condutividade ($\mu\text{s/cm}$) $T=32^{\circ}\text{C}$, para as amostras coletadas	120
Figura 5-58:	Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado nas colunas não saturadas (*UC: padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart).	121
Figura 5-59:	Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado das colunas não saturadas (*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).	121
Figura 5-60:	Sólidos Totais (mg/l), no efluente das colunas em condições não saturadas.	122
Figura 5-61:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições saturadas.	123
Figura 5-62:	Eficiência de remoção de DQO para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3\text{chorume}/\text{m}^3\text{SoloSeco}$	124
Figura 5-63:	Carga de DQO removida para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3\text{chorume}/\text{m}^3\text{SoloSeco}$	124
Figura 5-64:	Eficiência de remoção de DQO em função do volume aplicado por metro cúbico de solo seco.	125
Figura 5-65:	Valores do pH para as amostras dos efluentes coletados.	125
Figura 5-66:	Valores da Condutividade ($\mu\text{s/cm}$) $T=32^{\circ}\text{C}$, para as amostras coletadas	126
Figura 5-67:	Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado na coluna saturada (*UC: padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart).	126
Figura 5-68:	Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado da coluna saturada (*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).	127
Figura 5-69:	Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l), no efluente da coluna em condições saturadas.	127
Figura 5-70:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições não saturadas	128
Figura 5-71:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30, em condições não saturadas	128
Figura 5-72:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,50, em condições não saturadas	129
Figura 5-73:	Eficiência de remoção de DQO para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3\text{chorume}/\text{m}^3\text{SoloSeco}$	129
Figura 5-74:	Carga de DQO removida para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3\text{chorume}/\text{m}^3\text{SoloSeco}$	130
Figura 5-75:	Eficiência de remoção de DQO em função do volume aplicado por metro cúbico de solo seco.	130
Figura 5-76:	Valores do pH para as amostras dos efluentes coletados.	131
Figura 5-77:	Valores da Condutividade ($\mu\text{s/cm}$) $T=32^{\circ}\text{C}$, para as amostras coletadas	131
Figura 5-78:	Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado nas colunas não saturadas (*UC: padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart).	132

Figura 5-79:	Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado das colunas não saturadas (*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).	133
Figura 5-80:	Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l), no efluente das colunas em condições não saturadas.	133
Figura 5-81:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15.	136
Figura 5-82:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30.	136
Figura 5-83:	Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,50.	137
Figura 5-84:	Eficiência de remoção de DQO para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de 0,034 m ³ chorume/m ³ SoloSeco	137
Figura 5-85:	Carga de DQO removida para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de 0,034 m ³ chorume/m ³ SoloSeco	138
Figura 5-86:	Eficiência de remoção de DQO em função do volume aplicado por metro cúbico de solo seco.	138
Figura 5-87:	Valores do pH para as amostras compostas, dos efluentes coletados.	139
Figura 5-88:	Valores da Condutividade (µs/cm) T=32°C, para as amostras coletadas	139
Figura 5-89:	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /l), para as amostras dos efluentes coletados.	140
Figura 5-90:	Redução de Sólidos Totais (%), tendo como referência os Sólidos Totais do chorume utilizado no abastecimento, obtido através da realização de ensaios durante toda a campanha de ensaios, sendo obtida a média de 26.711 mg/l.	140
Figura 5-91:	Concentração de Cádmio no efluente das colunas abastecidas com chorume (mg/l).	141
Figura 5-92:	Concentração de Chumbo no efluente das colunas abastecidas com chorume (mg/l).	141
Figura 5-93:	Concentração de Zinco no efluente das colunas abastecidas com chorume (mg/l).	142
Figura 5-94:	Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15.	144
Figura 5-95:	Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30.	144
Figura 5-96:	Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,50.	145
Figura 5-97:	DQO efluente, para alimentação diária com água, com taxa de aplicação hidráulica diária de 0,034 m ³ chorume/m ³ SoloSeco.	145
Figura 5-98:	Carga de DQO efluente para alimentação diária com água, com taxa de aplicação hidráulica diária de 0,034 m ³ chorume/m ³ SoloSeco.	146
Figura 5-99:	Valores do pH para as amostras coletadas	146
Figura 5-100:	Valores da Condutividade (µs/cm) T=32°C, para as amostras coletadas	147
Figura 5-101:	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /l) .	147
Figura 5-102:	Sólidos Totais (mg/l) do efluente das colunas, descontando-se os Sólidos Totais da água utilizada no abastecimento das mesmas, obtido através da realização de ensaios da água durante toda a campanha de ensaios, sendo obtida a média de 124 mg/l.	148

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
Cempre	- Compromisso Empresarial para Reciclagem
COT	- Carbono Orgânico Total
CEC	- Cation exchange capacity
CTC	- Capacidade de Troca Catiônica (CTC)
DAE	- Departamento de Águas e Esgotos de Bauru
DBO ₅	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
EPA	- <i>Environmental Protection Agency</i>
FAU	- Formazin Attenuation Units
FEB	- Faculdade de Engenharia de Bauru - Unesp
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPMet	- Instituto de Pesquisas Meteorológicas
NBR	- Norma Brasileira
NTK	- Nitrogênio Total Kjeldahl
PEAD	- Polietileno de alta densidade
pH	- Potencial Hidrogeniônico
PVC	- Cloreto polivinílico
PtCo	- Platinum Cobalt Unit Standart
UC	- Unidade de Cor
UNESP	- Universidade Estadual Paulista
UT	- Unidade de Turbidez

LISTA DE SIMBOLOS

- A - Área de seção transversal [L²]
- C - Concentração [M/L³]
- CaCO₃ - Carbonato de cálcio
- E - Evaporação potencial não ajustada [cm]
- GC - Grau de Compactação [%]
- I - Índice de calor
- K - Coeficiente de permeabilidade [L/T]
- L - Comprimento [L]
- LL - Limite de liquidez
- LP - Limite de plasticidade
- M - Massa [M]
- NA - Nível d'água
- P - Fósforo
- Q - Vazão [L³/T]
- t - Tempo [T]
- t - Temperatura média mensal [°C]
- UC - Unidade de Cor
- UT - Unidade de Turbidez
- Ø - Umidade [%]
- µS - Micro Siemens
- ρ_d Solo Natural - Densidade Natural do solo [g/cm³]
- ρ_d Max. Proctor Norm - Densidade Máxima do Proctor Normal [g/cm³]

RESUMO

O tratamento de chorume tem-se tornado cada vez mais importante na medida em que novos aterros sanitários são construídos de acordo com a legislação vigente. Esta relevância está associada à grande quantidade de chorume captada pelo sistema de drenagem nos aterros com *liners* eficientes. O tratamento de chorume é dificultado pela dinâmica de suas características durante as estações do ano e também durante sua vida útil. Processos biológicos via de regra apresentam baixa eficiência na remoção de carga orgânica, exigindo ainda grandes bacias de equalização. Processos físico-químicos produzem grandes quantidades de lodo, necessitando ainda de maiores recursos para seu manejo. Portanto, tornam-se necessárias formas alternativas que auxiliem ou substituam os processos convencionais a custos reduzidos. Outra característica fundamental de todo aterro sanitário é grande demanda de terra para cobertura dos resíduos.

Desta forma, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar o potencial do emprego do solo de cobertura no tratamento ou pré-tratamento de chorume.

Este estudo foi efetuado com uso de uma areia fina pouco argilosa, residual do arenito, disposta em colunas de percolação sob diferentes condições de compactação as quais foram alimentadas com chorume proveniente do aterro controlado de Bauru. Avaliou-se ainda o comportamento do sistema quando alimentado com chorume de características diferenciadas, sob variadas taxas de aplicação hidráulica, sendo analisados os parâmetros DQO, Sólidos Totais, pH, Condutividade elétrica, Alcalinidade, Cor e Turbidez, para o chorume e para o efluente coletado das colunas.

A partir dos resultados obtidos para os parâmetros analisados, observou-se grande potencial de aplicação desta alternativa para o tratamento do chorume considerado, apresentando remoções sistemáticas de DQO acima de 90%, antes que se observasse a saturação do solo com a matéria orgânica, a qual ocorreu com a aplicação de cerca de 300 litros de chorume por metro cúbico de solo, obtendo-se a remoção de 0,59 g.DQO/kg.SoloSeco. Neste período, obteve-se ainda a remoção média de aproximadamente

60% de Sólidos Totais, o que acarretou em resultados significativos de redução de Cor e Turbidez. Observa-se também que a intermitência na alimentação, para os valores estudados, não influenciou significativamente a resposta do sistema.

Apesar da capacidade limitada das colunas, deve ser lembrado que a proposição está embasada na rotatividade do solo a ser empregado primeiramente no tratamento do chorume, em condições controladas, idealizando-se a utilização de baias similares a leitos de secagem, sendo este, posteriormente, utilizado na cobertura diária dos resíduos no aterro sanitário, cuja demanda de terra é bastante significativa.

ABSTRACT

The leachate treatment has become more relevant insofar as recent sanitary landfills have been built according to the current legislation. This relevance is associated to a large amount of leachate collected by drainage systems in sanitary landfills with efficient liners. The leachate treatment is difficult due to the variation on the quality and on the quantity of the leachate generated on the different seasons and during the landfill lifetime. The biological process to treat leachate needs large equalization basins and usually presents low efficiency. Physical-chemical processes produce large amounts of sludge at low efficiency and need more management resources. So, new alternative methods have to be used to assist or to replace inefficient processes. Another fundamental characteristic of sanitary landfills is the need of a large amount of soil to be used as a solid waste cover.

In this research, it was proposed to evaluate the potential use of a residual clayey fine sandy soil from sandstone to pre-treat the leachate from Bauru Sanitary Landfill. This sandy soil was compacted at different compaction degrees and the leachate was percolated through the column to assess soil retention. Each column was 1.0 m deep and 0.097 m in diameter and it received leachate from different seasons and from different drainage collection points as well as at different loading rates. The evaluated parameters in columns influent and effluents were: COD, total solids, pH, electric conductivity, alkalinity, color and turbidity.

The results indicate a great potential of this soil for leachate treatment, with COD removal efficiency above 90%, before the soil organic saturation. After that, there was an abrupt efficiency decay, that occurred with about 300 liters.leachate/m³.soil and the soil presented a removal rate of about 0.59 g.COD/kg.DrySoil. During this period it was observed an average efficiency of 60% in total solids removal and significant color and turbidity reduction. Intermittence in leachate application was not significant in efficiency response of contaminants removal.

In spite of the limited capacity of the columns, this proposal assumed a soil cover rotation in a landfill operation. Firstly, the soil can be used to treat the leachate under controlled condition and after that, it has to be placed as a solid waste cover. A low cost single basin with drainage system can receive the soil at low compaction degree to treat or pre-treat the leachate.

1 INTRODUÇÃO

Um dos problemas atualmente evidentes no País diz respeito ao manejo, inclusive o tratamento, e destinação dos resíduos sólidos urbanos, principalmente quando se trata dos impactos ambientais e da preservação dos recursos naturais, ou seja, o desenvolvimento sustentável, com interações complexas.

A partir de meados de 1990, no Brasil, houve um despertar para os problemas relacionados aos resíduos sólidos, especialmente os domésticos e, mais discretamente, os industriais. No caso dos resíduos sólidos domésticos, ressaltavam-se os impactos visuais e sociais, pela presença de inúmeros catadores nos lixões. Desde então, apesar dos vários enfoques e propostas equivocadas, houve uma evolução significativa, com o envolvimento cada vez maior da própria sociedade e do início de pesquisas no país, além da demanda por técnicos especializados.

A atuação de órgãos ambientais governamentais e do ministério público tem sido fundamental para essa evolução. Contudo, o direcionamento para solução da disposição final, muitas vezes, tem sido meramente burocrático, o que proporcionou a instalação de lixões sobre áreas contempladas com projetos de aterros sanitários. Nesses casos o que deveria ser aterro sanitário tornou-se aterro controlado, com as devidas limitações na prevenção de impactos ambientais, principalmente pela infiltração de chorume no solo.

Como resultado dessa experiência, observa-se que em novos sistemas dotados de *liners* a quantidade de chorume a ser tratado em períodos de chuva torna-se um desafio para muitos técnicos. Esta situação é consequência, também, da falta de planejamento na execução do aterro, expondo grandes áreas impermeabilizadas para pequena quantidade de resíduos dispostos.

Por outro lado, principalmente no Brasil, ainda é um grande desafio a destinação final para municípios que se enquadram na faixa de 20 a 50 t/dia, devido às exigências técnicas para os aterros e os custos unitários elevados para implantação e, principalmente, operação.

Na realidade o grande desafio é a regionalização de aterros sanitários, como forma de reduzir custos, diminuir a dispersão de resíduos e melhorar o controle ambiental.

No Brasil a importância do tratamento de chorume tem crescido na proporção direta da implantação dos novos aterros sanitários. Essa importância está associada à grande quantidade de chorume coletado pelo sistema de drenagem em aterros sanitários que possuem *liners* eficientes. Esta nova realidade exigirá que os aterros apresentem coberturas equivalentes aos *liners*. A operação dos aterros não se limitará somente em descarregar, compactar e cobrir, mas exigirá o planejamento cuidadoso visando reduzir ao máximo a área exposta que possa contribuir para a geração de chorume.

A escolha do processo ou processos de tratamento de chorume torna-se um item secundário, porém não menos importante. Mas o manejo do chorume é a chave para definir vazões e quais processos são mais indicados, principalmente quando se dispõe de uma metodologia que permita avaliar a qualidade do chorume ao longo tempo.

Ressalta-se a dificuldade de se tratar o chorume coletado, devido as suas características e variáveis intrínsecas, como, qualidade, quantidade e respectivas variações temporais, sofrendo ainda variações devido à execução, operação, sazonalidade e idade do aterro, sendo difícil atender os padrões de lançamento e ainda os padrões de qualidade dos corpos d'água receptores.

Das observações efetuadas nos estudos efetuados anteriormente por Hamada (2001), ficaram algumas questões pertinentes ao dimensionamento de um sistema de tratamento por percolação de chorume em uma areia fina pouco argilosa residual do arenito.

- Para um determinado tipo de solo, qual a taxa limite de aplicação hidráulica?
- Qual a influência da compactação considerando-se taxas de aplicação hidráulica maiores que os descritos previamente?
- Como viabilizar técnica e operacionalmente esse sistema?
- De acordo com a qualidade observada no efluente, quais alternativas de tratamento complementar poderiam ser aplicados para se obter um efluente de qualidade compatível ao pequeno córrego (baixa capacidade de diluição)?
- Qual a suscetibilidade à uma eventual lixiviação desse solo após seu uso como elemento filtrante de chorume, quando empregado como cobertura?

Tais questões motivaram a execução da presente pesquisa, a qual objetivou responder aos questionamentos apontados.

2 OBJETIVOS

A presente pesquisa teve como objetivo principal avaliar o potencial de uso do solo de cobertura de um aterro sanitário como elemento filtrante para tratamento de chorume. Tal pesquisa foi realizada com uso de uma areia fina pouco argilosa, residual do arenito, que foi disposta em colunas de percolação sob diferentes condições de compactação e taxas de aplicação hidráulica. São objetivos específicos da pesquisa:

- Estudar a influência dos parâmetros compactação e taxa de aplicação hidráulica sobre o escoamento do chorume e a qualidade do efluente das colunas de percolação;
- Avaliar a eficiência do sistema, para tratamento de chorume à partir da determinação dos parâmetros DQO, condutividade elétrica, pH, alcalinidade, cor e turbidez.
- Conceber os elementos básicos do leito percolador e estabelecer procedimentos operacionais para implantação de um sistema a partir dos parâmetros estudados.

A parte experimental do estudo visou simular condições prováveis de campo, com o objetivo de se obter parâmetros para projeto de sistema similar.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 RESÍDUOS

Dentre a diversidade de definições para o termo, em linhas gerais resíduos se referem a coisas sem utilidade ou valor. Por outro lado resíduos são restos da atividade humana e, fisicamente, contém basicamente os mesmos materiais que são encontrados nos respectivos produtos originais que tinham valor e utilidade.

Mais importante que a própria definição, é saber o que fazer com os resíduos. Segundo a abordagem de White *et al* (1993), uma solução básica para um resíduo seria restaurar seu valor até que deixe de ser considerado um resíduo. A perda ou ausência de valor em muitos casos está relacionada com a mistura ou ao desconhecimento de sua composição.

Mais especificamente, quando se trata de resíduo sólido, diversos grupos podem ser identificados ou classificados de acordo com a abordagem estabelecida.

Dentre os diferentes grupos de resíduos sólidos, os domiciliares, por natureza, são os mais complicados em termos de manejo, pois são constituídos por uma grande diversidade de materiais (plásticos, vidro, metais, vidro, e restos de alimento), via de regra, totalmente misturados. A composição desses resíduos também varia muito em função da sazonalidade e geograficamente (de um país para outro e de uma cidade para outra).

Por outro lado, resíduos sólidos comerciais e industriais tendem a ser mais homogêneos e em grande quantidade para cada um dos materiais.

3.1.1 CLASSIFICAÇÃO

Pelo fato de existir algumas divergências com relação à classificação, para fins do presente texto, resíduos sólidos domésticos constituem um grupo de resíduos classificados, segundo sua origem em:

- Domiciliares, provenientes de residências (casas e apartamentos);

- Comerciais, provenientes de lojas, restaurantes, mercados e supermercados, escritórios, hotéis, etc.;
- Institucionais, originados em escolas e instituições governamentais;
- Serviços municipais, resultantes de podas e manutenção de jardins, praças públicas, áreas de recreação, varrição de ruas, etc.

Considerando-se uma categoria mais abrangente, a qual será denominada de resíduos sólidos urbanos, serão incluídos além dos anteriores, os resíduos originados em:

- Construções, que são os entulhos resultantes das obras civis;
- Serviços de saúde, incluindo hospitais, clínicas, laboratórios, farmácias, núcleos de saúde, ambulatórios, etc.;
- Industriais, originados nos processos industriais dentro da área urbana, sejam perigosos ou não.

Resíduos originados na indústria, mas advindos dos setores administrativos, de refeitórios e de ambulatórios médicos, podem ser incluídos na categoria de resíduos sólidos domésticos.

Resíduos originados das atividades agropastoris pertencem a um grupo de resíduos denominados de agrícolas, inclusive das agroindústrias. Incluem-se, neste caso, alguns resíduos perigosos, tais como embalagens de defensivos agrícolas e de adubos, e respectivos produtos quando vencidos.

Resíduos especiais, originados nos portos e aeroportos, resultantes de viagens internacionais, seguem normas específicas de destinação.

Uma outra forma bastante empregada para classificação de resíduos sólidos segue as definições da NBR 10.004, que tem sido aplicada para definir a periculosidade do material. Esta classificação é usual para resíduos sólidos industriais, mas pode ser aplicada para outros tipos de resíduos sólidos.

3.1.2 COMPOSIÇÃO

Os resíduos sólidos domésticos, segundo definição adotada, são constituídos por misturas de restos de alimento, papel, papelão, plásticos, metal, vidro, madeira, trapos, couro, etc.

A composição física dos resíduos sólidos domésticos é importante para a seleção e operação de equipamentos e instalações, na otimização de recursos e consumo de energia e na análise e projeto de aterros sanitários.

Essa composição, por outro lado, varia com a localidade e com o estágio de desenvolvimento em que se está inserido. Tal variação é nítida quando se efetua uma comparação entre diferentes países e respectiva renda *per capita*, como ilustrado por Tchobanoglous *et al.* (1993) na Tabela 3-1.

Verifica-se que os valores observados na Tabela 3-1 são compatíveis com a composição observada em alguns municípios brasileiros.

Pessin *et al* (1991) da Universidade de Caxias do Sul desenvolveram, através do Grupo de Resíduos Sólidos do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, um programa de pesquisas sobre manejo, coleta, tratamento e destino final de resíduos sólidos domésticos no município de Caxias do Sul, RS, em três estações do ano. Nesse programa foi efetuado um estudo sobre a composição gravimétrica, como mostrado na Tabela 3-2.

Tabela 3-1: Distribuição típica para composição gravimétrica dos resíduos sólidos domésticos em função do estágio de desenvolvimento do país (Tchobanoglous, *et al* 1993).

Componente	Países de baixa renda <i>per capita</i>	Países de média renda <i>per capita</i>	Países de elevada renda <i>per capita</i>
Orgânico			
Restos de alimento	40-85	20-65	6-30
Papel e papelão	1-10 (soma)	8-30 (soma)	20-45 e 5-15
Plásticos	1-5	2-6	2-8
Têxteis	1-5	2-10	2-6
Borracha e couro	1-5	2-10	0-2
Podas e madeira	1-5 (soma)	1-10 (soma)	10-20 e 1-4
Inorgânicos			
Vidro	1-10	1-10	4-12
Metais em geral	1-5	1-5	3-12
Terra, pó, cinzas	1-40	1-30	0-10

Tabela 3-2: Composição Gravimétrica dos resíduos sólidos domésticos de Caxias do Sul - RS. (Pessin *et al*, 1991).

Componente	Porcentagem em peso (base úmida)			
	Inverno	Primavera	Verão	Média
Restos de alimento	48,70	53,00	53,43	51,7
Papel, papelão	26,50	15,30	21,03	20,9
Metais ferrosos	4,80	6,20	5,00	5,3
Trapo, couro, borracha	7,70	7,00	6,63	7,1
Plástico fino e grosso	8,70	9,50	8,87	9,0
Vidro	1,10	5,40	2,60	3,0
Madeira	0,80	1,90	1,13	1,3
Metais não ferrosos	0,40	0,20	0,33	0,3
Diversos	1,30	1,50	0,97	1,3

Caracterizações efetuadas no município de São Carlos, SP, são próximas daquelas observadas nos levantamentos de Gomes, *apud* Pinto *et al* (2000), como demonstram os valores indicados na Tabela 3-3. Neste estudo efetuou-se também uma classificação em termos de biodegradabilidade dos componentes avaliados.

Determinadas localidades do Brasil apresentam características bem diferenciadas daquelas observadas nos municípios da região Sul e Sudeste do Brasil, onde são verificados percentuais elevados de restos de alimento, como observado na Tabela 3-4 com dados fornecidos pela CONDER (1992).

Tabela 3-3: Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domésticos do município de São Carlos – SP e respectiva biodegradabilidade. (Gomes, *apud* Pinto *et al.*, 2000).

Componente	Porcentagem em peso (base úmida)	Biodegradabilidade	
		Classificação	% do total
Restos de alimento	56,7	Facilmente biodegradável	56,7
Papel, papelão	21,3	Moderadamente biodegradável	21,3
Trapo	3,4	Difícilmente biodegradável	5,7
Madeira, couro, borracha	2,3		
Vidro	1,4	Não biodegradável	16,3
Plástico	8,5		
Metal	5,4		
Inertes	1,3		

Tabela 3-4: Composição Gravimétrica do Lixo Domiciliar em dois municípios da região metropolitana de Salvador. (CONDER, 1992)

Componentes	Porcentagem em peso (base úmida)	
	Simões Filho	Lauro de Freitas
Restos de alimento	74,20	74,60
Papel	5,10	4,50
Papelão	3,00	2,40
Metais ferrosos	1,90	1,90
Trapo, couro, borracha	1,60	2,50
Plástico mole	8,80	10,1
Plástico duro	2,00	1,30
Vidro	3,30	1,50
Madeira	0,10	0,30
Metais não ferrosos	-	0,20
Outros	-	0,70
Produção per Capita	0,9 ± 0,2	0,7 ± 0,2
Massa específica (kg/m ³)	260,80	226,70

3.1.3 PROPRIEDADES

As propriedades físicas, químicas e biológicas dos resíduos sólidos domésticos são de grande importância para análise, concepção e dimensionamento dos elementos constituintes do sistema de manejo de resíduos sólidos. Possibilita a escolha de alternativas para coleta, tratamento destinação, assim como dos equipamentos envolvidos.

Propriedades Físicas

Dentre as propriedades físicas mais importantes dos resíduos sólidos domésticos, desatacam-se: massa específica, umidade, tamanho das partículas e sua distribuição, capacidade de campo e porosidade.

A massa específica é um parâmetro de importância uma vez que podem ser determinados diversos valores, considerando-se as condições em que se encontra o resíduo, ou seja: natural, como encontrado em recipientes, compactado (em caminhões compactadores e no aterro), entre outras situações.

Infelizmente, existe muita dificuldade na definição de padrões para a massa específica dos resíduos, devido a sua não uniformidade, e a questão das condições em que o mesmo se encontra (compactado ou não), muitas vezes não é bem definida. Contudo, Tchobanoglous *et al* (1993) apresenta valores referenciais para massa específica e umidade dos diversos tipos de resíduos, como mostrado na Tabela 3-5.

Tabela 3-5: Massa específica e umidade dos resíduos domiciliares, comerciais, industriais e agrícolas (Tchobanoglous et al, 1993).

Tipo de Resíduo	Massa Específica kg/m ³		Umidade % em peso	
	Faixa	Típico	Faixa	Típico
<i>Domiciliar (não compactado)</i>				
Restos de alimento (misturado)	131-481	291	50-80	70
Papel	42-131	89	4-10	6
Papelão	42-80	50	4-8	5
Plásticos	42-131	65	1-4	2
Têxteis	42-101	65	6-15	10
Borracha	101-202	131	1-4	2
Couro	101-261	160	8-12	10
Restos de jardim	59-225	101	30-80	60
Madeira	131-320	237	15-40	20
Vidro	160-481	196	1-4	2
Latas (aço)	50-160	89	2-4	3
Alumínio	65-240	160	2-4	2
Outros metais	131-1.151	320	2-4	3
Poeira, cinzas, etc.	320-1.000	481	6-12	8
Cinzas	650-831	745	6-12	6
Tralhas	89-181	131	5-20	15
<i>Restos de jardim (domiciliar)</i>				
Folhas (caídas e secas)	30-148	59	20-40	30
Gramma (cortadas)	208-297	237	40-80	60
Gramma (úmida e compactada)	593-831	593	50-90	80
Restos de jardim (pedaços)	267-356	297	20-70	50
Restos de jardim (composto)	267-386	326	40-60	50
<i>Doméstico</i>				
No veículo compactador	178-451	297	15-40	20
No aterro				
Normalmente compactado	362-498	451	15-40	25
Bem compactado	590-742	599	15-40	25
<i>Comercial</i>				

Tipo de Resíduo	Massa Específica kg/m ³		Umidade % em peso	
	Faixa	Típico	Faixa	Típico
Alimentos (úmidos)	475-949	540	50-80	70
Equipamentos	148-202	181	0-2	1
Engradado de madeira	110-160	110	10-30	20
Ornamento vegetal	101-181	148	20-80	5
Tralhas (combustível)	50-181	119	10-30	15
Tralhas (não combustível)	181-362	300	5-15	10
Tralhas (misturada)	139-181	160	10-25	15
<i>Construção e demolição</i>				
Demolição misturado (não combustível)	1.000-1.599	1.421	2-10	4
Demolição misturado (combustível)	300-400	359	4-15	8
Construção misturado (combustível)	181-359	261	4-15	8
Concreto	1.198-1.801	1.540	0-5	-
<i>Industrial</i>				
Lodo químico (úmido)	801-1.101	1.000	75-99	80
Cinzas	700-899	801	2-10	4
Tiras de couro	101-249	160	6-15	10
Tiras de metal (pesado)	1.501-1.999	1.780	0-5	-
Tiras de metal (leve)	498-899	739	0-5	-
Tiras de metal (misturado)	700-1.501	899	0-5	-
Óleos, piche, asfalto	801-1.000	949	0-5	2
Pó de serra	101-350	291	10-40	20
Têxteis	101-220	181	6-15	10
Madeira (misturada)	400-676	498	30-60	25
<i>Agrícola</i>				
Agrícola (misturado)	400-751	561	40-80	50
Animais mortos	202-498	359	-	-
Frutas (misturadas)	249-751	359	60-90	75
Esterco (úmido)	899-1.050	1.000	75-96	94
Vegetais (misturados)	202-700	359	60-90	75

As dimensões e a distribuição do tamanho dos materiais componentes dos resíduos sólidos domésticos ganham maior importância quando existe interesse na sua recuperação, principalmente por meios mecânicos. Dentre os materiais de maior tamanho médio, destacam-se o papelão e o papel, seguido pelo plástico, tomando-se como base o comprimento como maior dimensão.

A capacidade de campo dos resíduos sólidos domésticos é representada pela umidade total que pode ser retida em uma amostra de resíduo, submetido à ação gravitacional. A

capacidade de campo desses resíduos é de importância crítica na formação do chorume nos aterros sanitários. A quantidade de chorume pode ser relacionada diretamente com o excedente da capacidade de campo.

A capacidade de campo varia com o grau compactação e o estado de decomposição do resíduo aterrado. A capacidade campo de resíduos domésticos não compactados varia entre 50 e 60%, considerando-se os dados de Tchobanoglous *et al.* (1993).

Propriedades Químicas

As informações sobre a composição dos resíduos sólidos domésticos são de grande importância na avaliação de processos alternativos e opções de reciclagem. A prática da incineração, por exemplo, torna-se viável, dependendo da composição química dos resíduos.

O conteúdo energético pode ser determinado em laboratório, empregando-se calorímetros ou estimado por cálculos baseados na composição elementar de componentes conhecidos dos resíduos domésticos.

Quando há interesse na conversão biológica dos resíduos domésticos, tais como compostos (de compostagem), metano e etanol, as informações dos nutrientes essenciais são de grande importância na manutenção do equilíbrio e da eficiência na conversão.

Tabela 3-6: Dados típicos da composição de componentes dos resíduos sólidos domiciliares.

Componente	Porcentagem em peso base seca (%)					
	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	Cinzas
<i>Orgânico</i>						
Restos de alimento	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Papelão	44,0	5,9	44,6	0,3	0,2	5,0
Plásticos	60,0	7,2	22,8	-	-	10,0
Têxteis	55,0	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
Borracha	78,0	10,0	-	2,0	-	10,0
Couro	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0
Podas de jardins	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5
Madeira	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5
<i>Inorgânico</i>						
Vidro	0,5	0,1	0,4	<0,1	-	98,9
Metais	4,5	0,6	4,3	<0,1	-	90,5
Pó, cinza, etc.	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68,0

Propriedades Biológicas

Excluindo plásticos, borracha, e couro, os demais componentes orgânicos presentes nos resíduos sólidos domésticos podem ser classificados como:

- Componentes solúveis em água (açúcar, amido, aminoácidos e vários ácidos orgânicos);
- Hemicelulose (produto da condensação de determinados açúcares);
- Celulose (produto de condensação da glicose);
- Gordura, óleos e ceras (ésteres de álcool e longas cadeias de ácidos graxos)
- Lignina (matéria polimérica contendo cadeias aromáticas com grupos -OCH₃);
- Ligninocelulose (combinação de lignina e celulose); e
- Proteínas.

Tabela 3-7: Dados típicos da composição de componentes dos resíduos domiciliares, comerciais e industriais.

Tipos de resíduos	Porcentagem em peso base seca (%)					
	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	Cinzas
<i>Alimentos</i>						
Gordura	73,0	11,5	14,8	0,4	0,1	0,2
Restos de alimento (misturado)	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Vegetais	48,5	6,2	39,5	1,4	0,2	4,2
Carnes	59,6	9,4	24,7	1,2	0,2	4,9
<i>Papel/papelão</i>						
Papelão	43,0	5,9	44,8	0,3	0,2	5,0
Revistas	32,9	5,0	38,6	0,1	0,1	23,3
Jornais	49,1	6,1	43,0	<0,1	0,2	1,5
Papel (misturado)	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2	6,0
Papelão encerado	59,2	9,3	30,1	0,1	0,1	1,2
<i>Plásticos</i>						
Plásticos (misturados)	60,0	7,2	22,8	-	-	10,0
Polietileno	85,2	14,2	-	<0,1	<0,1	0,4
Poliestireno	87,1	8,4	4,0	0,2	-	0,3
Poliuretano	63,3	6,3	17,6	6,0	<0,1	4,3
PVC	45,2	5,6	1,6	0,1	0,1	2,0
<i>Têxteis, borrachas e couros</i>						
Têxteis	48,0	6,4	40,0	2,2	0,2	3,2
Borrachas	69,7	8,7	-	-	1,6	20,0

Tipos de resíduos	Porcentagem em peso base seca (%)					
	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	Cinzas
Couro	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0
<i>Madeira, árvores, etc.</i>						
Restos de quintal	46,0	6,0	38,0	3,4	0,3	6,3
Madeira (construção)	50,1	6,4	42,3	0,1	0,1	1,0
Madeira de lei	49,6	6,1	43,2	0,1	<0,1	0,9
Madeira (misturada)	49,5	6,0	42,7	0,2	<0,1	1,5
Aparas de madeira (misturados)	48,1	5,8	45,5	0,1	<0,1	0,4
<i>Vidro, metais, etc.</i>						
Vidro e minerais	0,5	0,1	0,4	<0,1	-	98,9
Metais (misturados)	4,5	0,6	4,3	<0,1	-	90,5
<i>Diversos</i>						
Restos de escritórios	24,3	3,0	4,0	0,5	0,2	68,0
Óleos, tintas	66,9	9,6	5,2	2,0	-	16,3
Restos de combustíveis	44,7	6,2	38,4	0,7	<0,1	9,9

Tabela 3-8: Dados típicos aproximados de conteúdo e energia para materiais encontrados em resíduos sólidos urbanos.

Tipo de resíduos	Percentual aproximado (em peso)				Conteúdo energético (kJ/kg)		
	Umidade	Material volátil	Carbono fixo	Não combustível	Como coletado	Seco	Seco s/ cinza
Alimentos							
Gordura	2,0	95,3	2,5	0,2	37.530	38.300	39.161
Restos de alimento (misturado)	70,0	21,4	3,6	5,0	4.180	13.916	16.701
Vegetais	78,7	16,6	4,0	0,7	3.970	18.638	19.271
Carnes	38,8	56,4	1,8	3,1	17.731	28.970	30.517
Papel/papelão							
Papelão	5,2	77,5	12,3	5,0	16.380	17.278	18.240
Revistas	4,1	66,4	7,0	22,5	12.221	12.742	16.647
Jornais	6,0	81,1	11,5	1,4	18.550	19.734	20.032
Papel (misturado)	10,2	75,9	8,4	5,4	15.814	17.610	18.738
Papelão encerado	3,4	90,9	4,5	1,2	26.344	27.270	27.614
Plásticos							
Plástico (misturado)	0,2	95,8	2,0	2,0	32.799	33.471	37.272
Polietileno	0,2	98,5	<0,1	1,2	43.466	43.552	44.082
Poliestireno	0,2	98,7	0,7	0,5	38.191	38.265	38.216
Poliuretano	0,2	87,1	8,3	4,4	26.061	26.112	27.317
PVC	0,2	86,9	10,8	2,1	22.690	22.734	23.225
Têxteis, borrachas e couro							
Têxteis	10,0	66,0	17,5	6,5	18.515	20.571	22.858
Borracha	1,2	83,9	4,9	9,9	25.330	25.637	28.494

Tipo de resíduos	Percentual aproximado (em peso)				Conteúdo energético (kJ/kg)		
	Umidade	Material volátil	Carbono fixo	Não combustível	Como coletado	Seco	Seco s/ cinza
Couro	10,0	68,5	12,5	9,0	17.445	18.701	20.892
Madeira, árvores, etc.							
Resíduos de jardins	60,0	30,0	9,5	0,5	6.050	15.126	15.317
Madeira (construção)	50,0	42,3	7,3	0,4	4.885	9.769	9.848
Madeira de lei	12,0	75,1	12,4	0,5	17.101	19.431	19.543
Madeira (misturada)	20,0	68,1	11,3	0,6	15.445	19.343	19.499
Vidro, metal, etc.				96-99+	195	200	140
Vidro e mineral	2,0				-	-	-
Metal, latas	5,0			94-99+	700	742	737
Metal, ferrosos	2,0			96-99+	-	-	-
Metal, não ferrosos	2,0			94-99+	-	-	-
Diversos							
Restos de escritórios	3,2	20,5	6,3	70,0	8.534	8.818	31.848
RSU - Domiciliares	21,0	52,0	7,0	20,0	11.630	14.538	19.383
RSU - Comerciais	15,0	-	-		12.793	15.049	-
RSU	20,0	-	-		10.700	13.375	-

Biodegradabilidade

A biodegradabilidade da fração orgânica é frequentemente medida através do conteúdo de sólidos voláteis, determinado pela queima acima de 550 °C, contudo os resultados podem ser, por vezes, enganosos, pois determinados produtos altamente voláteis são pouco biodegradáveis. Alternativamente o conteúdo de lignina dos resíduos pode ser usado para estimar a fração biodegradável e, neste caso, diversos compostos orgânicos podem ser listados para identificação da biodegradabilidade, como mostrado na Tabela 3-9.

Tabela 3-9: Dados de fração biodegradável de alguns resíduos orgânicos, baseados no conteúdo de lignina calculados por Chandler, *et al* (1980).

Componente	Porcentagem de Sólidos Voláteis em relação aos Sólidos Totais	Porcentagem de Lignina em relação aos Sólidos Voláteis	Fração biodegradável
Restos de alimento	7-15	0,4	0,82
Papel			
Jornais/revistas	94,0	21,9	0,22
Papéis de escritórios	96,4	0,4	0,82
Papelão	94,0	12,9	0,47
Podas (jardins)	50-90	4,1	0,72

Materiais com maior quantidade de lignina, tais como revistas e jornais, apresentam menor biodegradabilidade que outros resíduos orgânicos encontrados no lixo doméstico. A taxa com que ocorre a degradação dos principais componentes orgânicos do lixo doméstico varia consideravelmente, e do ponto de vista prático podem ser classificados em rapidamente e lentamente degradáveis.

Odores

Odores surgem de resíduos sólidos quando se verifica o armazenamento por períodos relativamente longos no intervalo da geração “in loco” e a coleta, nas estações de transbordo e nos aterros sanitários. Essas ocorrências tornam-se significativas em locais de clima tropical, como no Brasil.

A formação de odores resulta da decomposição anaeróbia de componentes biodegradáveis. Por exemplo, sob condições anaeróbias, o sulfato pode ser reduzido a sulfeto, que posteriormente combina com o hidrogênio para formar H_2S .

Os íons sulfeto podem também combinar com sais metálicos, tais como ferro, e formar sulfetos metálicos. A cor preta ou escurecida dos resíduos sólidos submetidos à decomposição anaeróbia em aterros, ocorre primariamente pela formação de sulfetos metálicos.

A redução de compostos orgânicos contendo um radical de enxofre pode iniciar a formação de compostos como metil-mercaptana e ácidos aminobutíricos, que apresentam odores desagradáveis. A metil-mercaptana pode ser hidrolizada bioquimicamente para metil-álcool e sulfeto de hidrogênio.

Moscas

A procriação de moscas é um problema constante em países como o Brasil, portanto são muito importantes considerações sobre o armazenamento, principalmente no local de origem.

As moscas podem se desenvolver em menos de duas semanas após a postura de ovos. Dentro deste ponto vista, o período em que ocorre a formação da pulpa no aterro sanitário pode ser inferior ao período de desenvolvimento (9 a 11 dias), uma vez que o período de armazenamento desde sua geração (ou às vezes antes) até sua disposição no aterro, podem ser

elevados. Na Tabela 3-10 é mostrado o desenvolvimento das moscas domésticas, a partir da postura.

Tabela 3-10: Fases de desenvolvimento de moscas domésticas (Salvato, 1992)

Fase	Tempo
Eclosão de ovos	8-12 horas
Primeiro estágio do período larval	20 horas
Segundo estágio do período larval	24 horas
Terceiro estágio do período larval	3 dias
Estágio de Pulpa	4-5 dias
Total	9-11 dias

Ainda, durante o estágio larval, as larvas podem aderir-se nas paredes dos recipientes e containers, e podem ser transportados posteriormente ao aterro sanitário, onde finalizam seu desenvolvimento. Neste aspecto, a cobertura diária é imprescindível na redução e eliminação de moscas dos aterros sanitários e arredores.

3.1.4 TIPOS DE DISPOSIÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS

Lançamento a Céu Aberto ou “Lixão”

É uma forma de disposição final de resíduos urbanos, na qual estes resíduos sólidos são simplesmente descarregados sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública.

Esta forma de disposição facilita a proliferação de vetores, geração de odores, poluição das águas superficiais e subterrâneas pelo lixiviado, além de impedir o controle dos resíduos encaminhados para o local de disposição. É, sob todos os aspectos, a pior forma de disposição de resíduos sólidos, embora em levantamentos realizados pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), represente a solução para mais de 70% das comunidades brasileiras.

Aterro Controlado

É uma forma de disposição final dos resíduos urbanos, na qual precauções tecnológicas executivas adotadas durante o desenvolvimento do aterro, como o recobrimento dos resíduos com argila, aumentam a segurança do sistema, minimizando os riscos de impactos ambientais e à saúde pública. Embora seja uma técnica preferível ao lançamento a céu aberto, não substitui o aterro sanitário; é uma solução compatível (não completamente adequada) para municípios pequenos. É adotada no Brasil, como solução para aproximadamente 13% dos municípios.

Aterro Sanitário

O aterro sanitário é uma forma de disposição final de resíduos urbanos, dentro de critérios de engenharia e normas operacionais específicas, proporcionando o confinamento seguro dos resíduos, evitando danos ou riscos à saúde pública e minimizando os impactos ambientais. Esses critérios mencionados materializam-se no projeto de sistemas de drenagem periférica e superficial para afastamento de águas de chuva, de drenagem de fundo para a coleta do lixiviado, de sistema de tratamento para o lixiviado drenado, de drenagem e queima de gases gerados durante o processo da bioestabilização da matéria orgânica. É, sem dúvida, uma interessante alternativa de disposição final de resíduos sólidos para os países em desenvolvimento como o Brasil. Atualmente, cerca de 10% das comunidades brasileiras solucionaram seu problema de disposição de lixo adotando a técnica do aterro sanitário.

3.2 ATERRO SANITÁRIO

3.2.1 Definições

O planejamento, projeto e operação de aterros sanitários modernos envolvem a aplicação de uma variedade de princípios científicos, de engenharia e econômicos.

Historicamente, aterros sanitários têm sido o método mais econômico e ambientalmente aceitável para disposição de resíduos sólidos em qualquer país do mundo. Mesmo com a implementação de tecnologias de redução de lixo, reciclagem e transformação,

a disposição de resíduos sólidos nos aterros sanitários permanece como um componente importante na estratégia de manejo integrado dos resíduos sólidos.

No passado o termo aterro sanitário era empregado para denotar o lugar em que os resíduos eram lançados e cobertos ao final do dia. No Brasil, confundia-se aterro sanitário com os atuais “lixões”, em que nem sempre ocorre a cobertura ao final do dia.

Atualmente, aterro sanitário refere-se a instalações projetadas e operadas para a disposição de lixo doméstico com a finalidade de minimizar impactos ambientais e problemas de saúde pública. Dentro dessas instalações, ocorrem transformações, que compõe na realidade um sistema de tratamento, uma vez que os projetos atuais visam a aceleração do processo de degradação da matéria orgânica. As atividades das instalações incluem monitoramento do fluxo de resíduos que entram no aterro, descarga e compactação, além de elementos de monitoramento ambiental.

O termo *célula* é empregado para descrever o volume de material disposto em aterro sanitário durante determinado período de operação. A célula de um dia corresponde à *célula diária* e determinadas etapas de implantação correspondem à célula respectiva. Após a descarga e compactação diária emprega-se a *cobertura diária*, consistindo de uma camada que varia de 12 a 30 cm de material estável, que pode ser um composto (de compostagem). A cobertura tem como finalidade controlar o carreamento do material pelo vento; prevenir contra a entrada e/ou saída de ratos, moscas, baratas e outros vetores de doenças; além de controlar a formação de percolados durante a operação do aterro.

O conjunto horizontal limitado das células diárias compõe uma *camada de resíduos* formada por lixo compactado mais a cobertura diária. Tradicionalmente, os aterros são compostos por diversas camadas com espessura variável. No limite lateral externo entre uma camada e outra, são dispostas as *bermas* ou patamares, que são empregadas para manter a estabilidade do aterro, dispor os canais de drenagem superficial e para a locação de tubulações para exaustão de gás, quando ocorrer.

Para melhor compreensão do aterro sanitário moderno, é apresentado na Figura 3-2 uma definição esquemática para operações e processos envolvidos. Segue-se na Figura 3-1 um esquema de desenvolvimento do aterro ao longo de sua vida útil.

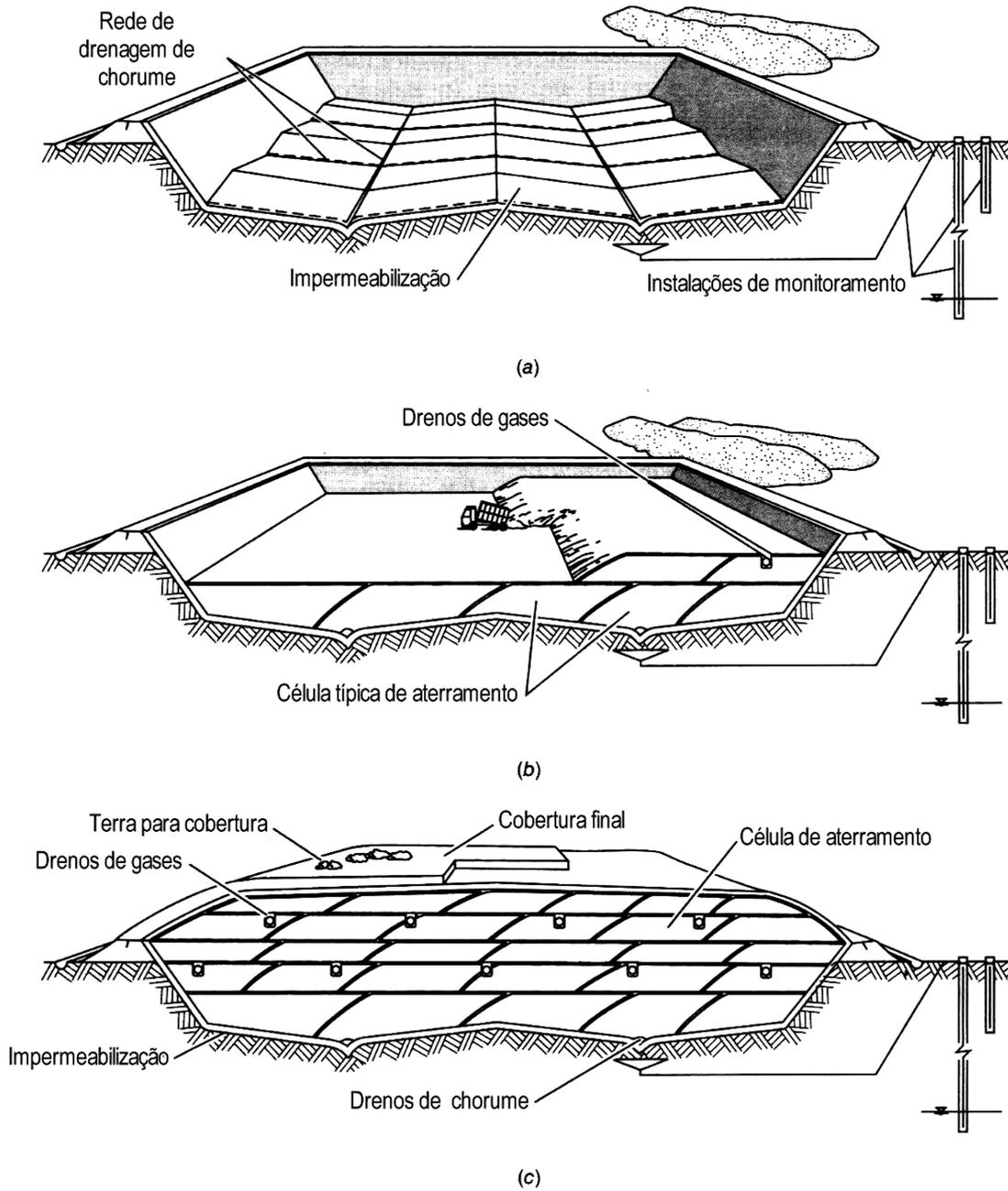


Figura 3-1: Desenvolvimento e encerramento de um aterro sanitário: (a) escavação e impermeabilização; (b) Disposição de lixo; (c) encerramento do aterro.

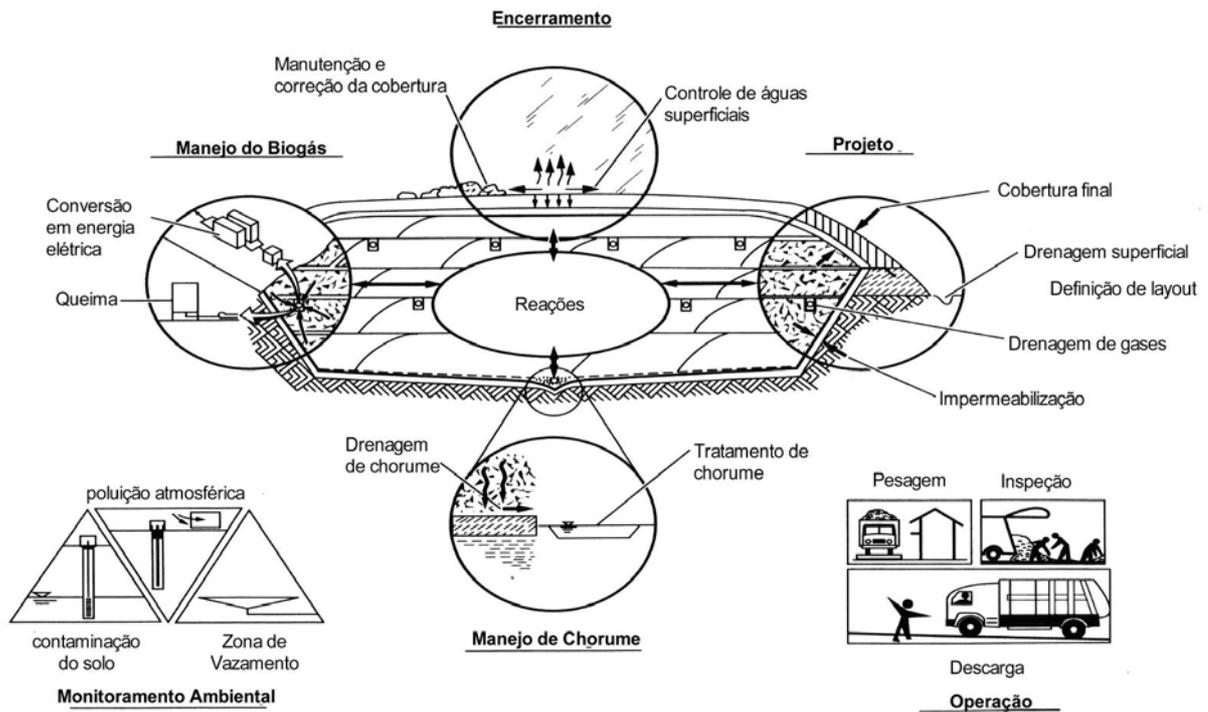


Figura 3-2: Esquema conceitual de operações e processos em um aterro sanitário segundo Tchobanoglous *et al*, 1993.

3.2.2 Classificação

Resíduos sólidos domésticos abrangem uma gama muito grande de resíduos, gerados dentro de uma comunidade, podendo abranger, além da origem domiciliar, aqueles gerados no comércio e aqueles industriais, considerados inertes e alguns tipos de não inertes, além daqueles originados no serviço público.

3.2.2.1 Quanto ao Tipo

Aterros sanitários convencionais são utilizados basicamente, para disposição desses resíduos, sem controle efetivo sobre formas diferenciadas de descarga ou compactação, podendo ocorrer alguma forma de separação prévia de materiais recicláveis, como papel, papelão, vidro, plásticos e metais.

Aterros projetados para máximo aproveitamento de biogás (Tchobanoglous *et al*, 1993), é uma situação inexistente no Brasil, porém bastante comum em alguns países europeus. Nesses casos, são necessários projetos especiais. Como exemplo, a elevação da

altura ou profundidade das camadas de resíduos, células individuais (aterros celulares) em que os resíduos são dispostos sem camadas intermediárias de cobertura e o chorume é reciclado com a finalidade de acelerar o processo de decomposição.

Aterros sanitários como unidade em um sistema integrado de tratamento (White *et al*, 1993 e Tchobanoglous *et al*, 1993), corresponde propriamente a diferenciações no método de operação, separando-se o conteúdo orgânico para ser disposto no mesmo. O processo de biodegradação pode ser acelerado pelo aumento da umidade, seja através da recirculação do chorume ou por adição de lodos de sistemas de tratamento de esgotos ou estrume de animais (preferencialmente ruminantes). O material degradado pode ser posteriormente removido e empregado como material de cobertura e as células escavadas podem ser novamente ocupadas.

3.2.2.2 *Quanto aos Métodos*

Segundo Tchobanoglous *et al* (1993) basicamente podem ser identificados três métodos de execução de aterro sanitário: a) por escavação, b) de ocupação de área, e c) de ocupação de vales, como mostrado na Figura 3-3.

O *método por escavação* é idealizado para áreas em que é possível a obtenção de profundidades adequadas de material para cobertura e áreas onde o nível do lençol freático não se encontra próximo à superfície. Neste método o solo é escavado e empregado para cobertura diária e final. As células escavadas ou trincheiras são revestidas com mantas de membrana sintética ou solo argiloso de baixa permeabilidade, ou mesmo a combinação de ambos.

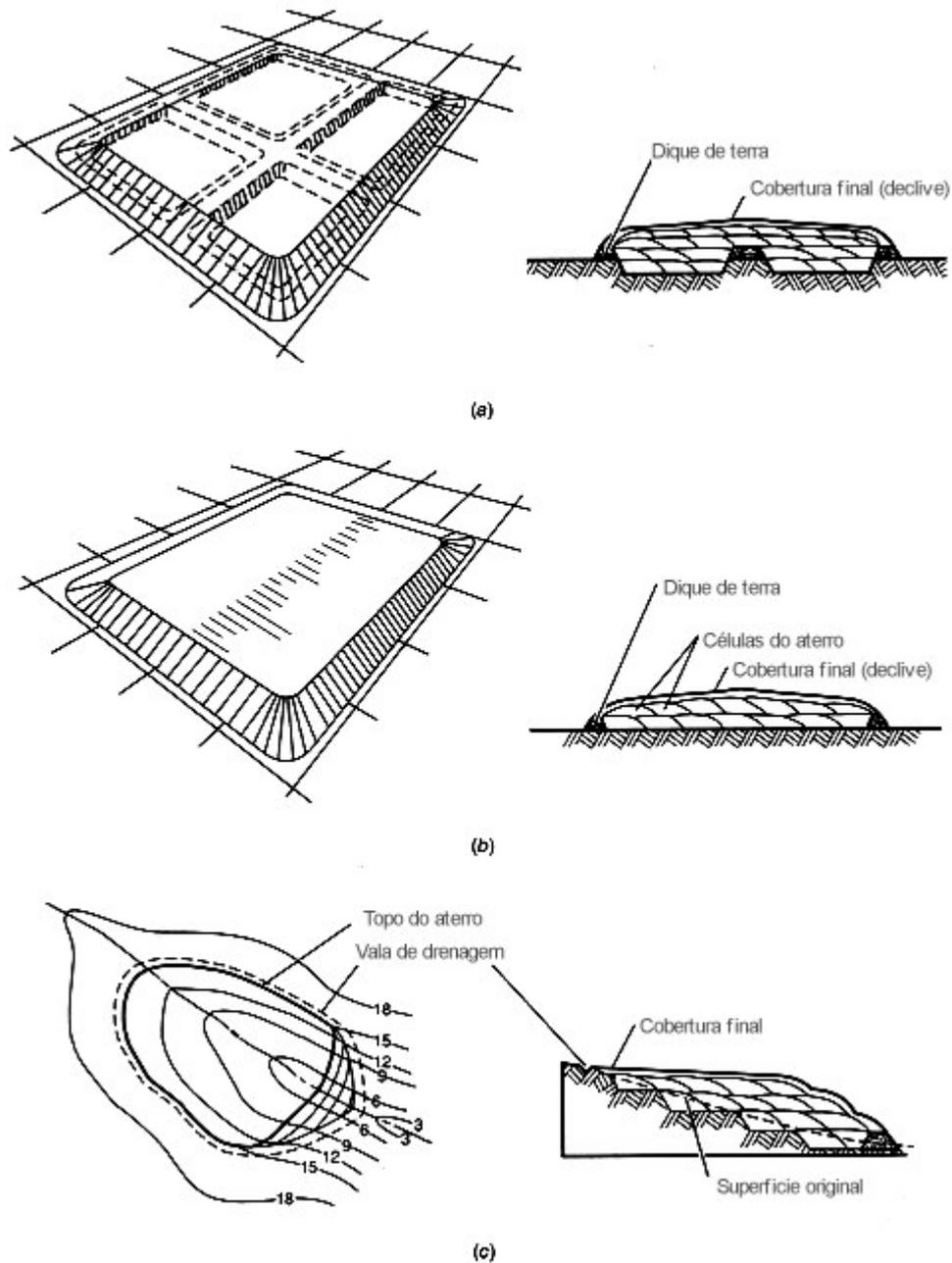


Figura 3-3: Métodos de disposição: (a) por escavação; (b) ocupação de área; e (c) ocupação de vales (Tchobanoglous *et al*, 1993).

O método de ocupação de área é empregado quando o terreno não é adequado à escavação de células ou trincheiras ou então em situações em que o nível do lençol freático é muito alto (próximo à superfície). A preparação do local inclui a instalação de revestimentos e sistemas de controle de chorume.

O método de ocupação de vales corresponde à disposição de resíduos em canyons, ravinas, áreas de empréstimo drenadas e jazidas exploradas de rocha (pedreiras). Nesses casos são previstas disposições de diversas camadas e deve-se prevenir o acúmulo de água no

aterro, com um eficiente sistema de drenagem. O viabilidade desse método está vinculado a existência de material de cobertura, principalmente das camadas individuais.

O método de disposição dos resíduos que pode ser considerado dos mais eficientes, é fundamentalmente um misto entre o *de ocupação de área* e o *de escavação*, uma vez que a escavação mais profunda é normalmente limitada pela capacidade de drenagem natural e pela altura das camadas de lixo. Escavações muito profundas dificultam a drenagem do chorume, e, conseqüentemente a operação do mesmo. Também a implementação de um aterro modular, com definição de bases e células com relativa independência, permite a distribuição adequada de custos, ao longo da vida útil do sistema.

3.3 CHORUME

Chorume pode ser definido como a fase líquida da massa aterrada de resíduos, que percola através desta removendo materiais dissolvidos ou suspensos. Na maioria dos aterros sanitários, o chorume é composto pelo líquido que entra na massa aterrada de lixo advindo de fontes externas, tais como sistemas de drenagem superficial, chuva, lençol freático, nascentes e aqueles resultantes da decomposição do lixo.

3.3.1 QUALIDADE

3.3.1.1 Parâmetros de Qualidade do Chorume

Quando a água percola através da massa de lixo aterrada, que está em decomposição, material biológico e componentes químicos são carregados para a solução. Na Tabela 3-11 são apresentados dados representativos das características de chorume, tanto para aterros novos como para mais antigos (estabilizados), segundo Tchobanoglous (1993).

A composição química do chorume, segundo o autor, varia muito, dependendo da idade do aterro e dos eventos que ocorreram antes da amostragem. Por exemplo, se o chorume é coletado durante a fase ácida, o pH será baixo, porém parâmetros como DBO₅, COT, DQO, nutrientes e metais pesados deverão ser elevados. Contudo durante a fase metanogênica o pH varia entre 6,5 e 7,5 e os valores de DBO₅, COT, DQO e nutrientes serão significativamente menores.

Tabela 3-11: Dados típicos da composição do chorume para aterros novos e antigos segundo Tchobanoglous, 1993).

Características	Valores (mg/l)		
	Novos aterros (menos de 2 anos)		Aterros antigos
	Faixa de variação	Típico	(mais de 10 anos)
DBO ₅	2.000-30.000	10.000	100-200
COT (carbono orgânico total)	1.500-20.000	6.000	80-160
DQO	3.000-60.000	18.000	100-500
Sólidos suspensos totais	200-2.000	500	100-400
Nitrogênio orgânico	10-800	200	80-120
Nitrogênio amoniacal	10-800	200	20-40
Nitrato	5-40	25	5-10
Fósforo total	4-100	30	5-10
Alcalinidade como CaCO ₃	1.000-10.000	3.000	200-1.000
PH	4,5-7,5	6	6,6-7,5
Dureza total como CaCO ₃	300-10.000	3.500	200-500

A biodegradabilidade do chorume varia com o tempo e pode ser determinada pela relação DBO₅/DQO. Inicialmente essa relação situa-se em torno de 0,5 ou maior; e relações entre 0,4 e 0,6 são indicadores da melhor biodegradabilidade. Em aterros antigos, a mesma relação situa-se normalmente na faixa entre 0,05 e 0,2. Como resultado dessa variação nas características do chorume, o projeto de sistemas de tratamento é bastante complexo.

Compostos Orgânicos

Basicamente, os compostos orgânicos são caracterizados pela ligação carbono-carbono. Uma forma de classificar os compostos orgânicos é a identificação de três grupos:

- Ácidos graxos, de baixo peso molecular (ex.: ácidos acético, propiônico e butírico)
- Ácidos Húmicos, de elevado peso molecular (ex: tipo carboidratos, carboxil e grupos hidroxil aromáticos)
- Substâncias do tipo ácido fúlvico, de peso molecular intermediário

Chian e deWalle (1975), realizaram estudos para determinar a composição da fração orgânica do chorume. Seus estudos detectaram entre 20 e 70% de ácidos graxos voláteis

livres como parte do Carbono Orgânico Total (COT) do chorume, dependendo da idade do aterro. Os percentuais de ácidos graxos tendem a diminuir com o aumento da idade do aterro. Os compostos orgânicos restantes foram distribuídos em quantidades iguais entre grupos de compostos de ácidos fúlvicos, ácidos tânicos, ligninas, material celulósico e outras formas de matéria orgânica.

Estudos de Qasim e Burchinal (1970), demonstraram que concentrações de substâncias orgânicas (COT, DQO e DBO) e relações DBO/DQO, são geralmente elevadas durante os estágios mais ativos (iniciais) de decomposição e gradualmente tendem a reduzir conforme o aterro se estabiliza organicamente.

Análises de amostras de chorume de aterros mais estabilizados, coletadas por Chian e deWalle (1975), confirmaram o decréscimo generalizado de ácidos graxos no chorume com o passar do tempo, e mostraram que a maior parte do material orgânico estava presente na forma de moléculas do tipo fulvicas refratárias. Somente 0,5% do Carbono Orgânico Total estava presente na forma de material húmico de elevado peso molecular. Estes autores sugerem que esse tipo de chorume, mais estabilizado, pode ser mais bem tratado através de processos físicos e químicos, ao invés de processos biológicos.

Compostos Nitrogenados

Nitrogênio amoniacal e nitrogênio orgânico, que coletivamente são denominados de Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), representam um percentual bastante elevado de compostos de nitrogênio presentes no chorume. Devido às condições anaeróbias no interior do aterro, as concentrações de nitrito e nitrato são normalmente baixas.

Quando se verifica um conteúdo de nitrogênio amoniacal muito elevado (ex: acima de 1.000 mg/l), do ponto de vista do tratamento biológico, a nitrificação pode ser inibida. Bactérias nitrificantes também são relativamente sensíveis a baixas temperaturas. Em virtude dessas condições, torna-se necessário reduzir a concentração de nitrogênio amoniacal, para valores mais aceitáveis, através de processos físico-químicos, antes da implementação de um tratamento biológico.

Compostos de Fósforo

Normalmente o chorume apresenta baixas concentrações de fósforo, cuja deficiência limita o tratamento biológico. A mais alta concentração de fósforo solúvel, citada por

Robinson e Maris (1979), foi de 0,41 mg/l, sendo que concentrações inferiores a 0,4 mg/l foram bastante comuns. Relações de DBO/P maiores que 7.000/1 tem sido encontradas em chorume resultante de recentes disposições de lixo. Uma vez que se consideram valores de DBO/P ótimos para tratamento biológico, em torno de 100/1 (Metcalf & Eddy, 1991), o tratamento biológico pode ser inibido pela deficiência de fósforo, a menos que seja feita sua adição.

pH

Durante a fase ácida de decomposição, o pH é relativamente baixo, assim isto irá requerer um ajuste para permitir o tratamento biológico. Neste caso, ainda, se houver necessidade de remoção de metais, o pH deve ser ajustado para que ocorra a sua precipitação.

Metais Pesados

Em geral, a remoção de metais deve ocorrer se for empregado quaisquer das formas de tratamento biológico (aeróbio ou anaeróbio), pois nesse processo ocorre sua precipitação (Forgie, 1988). Se for empregado o tratamento anaeróbio, os metais tenderão se precipitar como sulfetos metálicos, e por outro lado, se for empregado o tratamento aeróbio, os metais tendem a se oxidar e precipitar como hidróxidos metálicos. Contudo, pode haver condições específicas quando elevadas concentrações de certos metais, como o cobre, o zinco e o níquel, podem causar a inibição biológica. Nestes casos a precipitação química pode ser necessária.

Por outro lado, a remoção de certos íons metálicos, tais como: Zn, Fe, Mn e Pb, em conjunto com a formação de lodo químico ou biológico, podem representar um problema na disposição do lodo. Nestes casos a concentração de metais pode ser bem maior que a previamente existente, representando um problema a ser pensado.

Sólidos Dissolvidos

O chorume contém normalmente elevado conteúdo de sólidos totais dissolvidos (cloretos, sulfatos, sódio). Estes constituintes não são muito reativos, portanto não são facilmente removíveis. Caso seja necessária sua remoção, devem ser aplicados processos físico-químicos.

3.3.1.2 Variações na Qualidade do Chorume

Conceitualmente, como descrito por Tchobanoglous *et al* (1993), a qualidade do chorume, assim como a composição do gás de um aterro sanitário varia em função das fases de degradação em que se encontra a massa de resíduos biodegradáveis. Portanto, a qualidade do chorume pode ser expressa como mostrado na Figura 3-4.

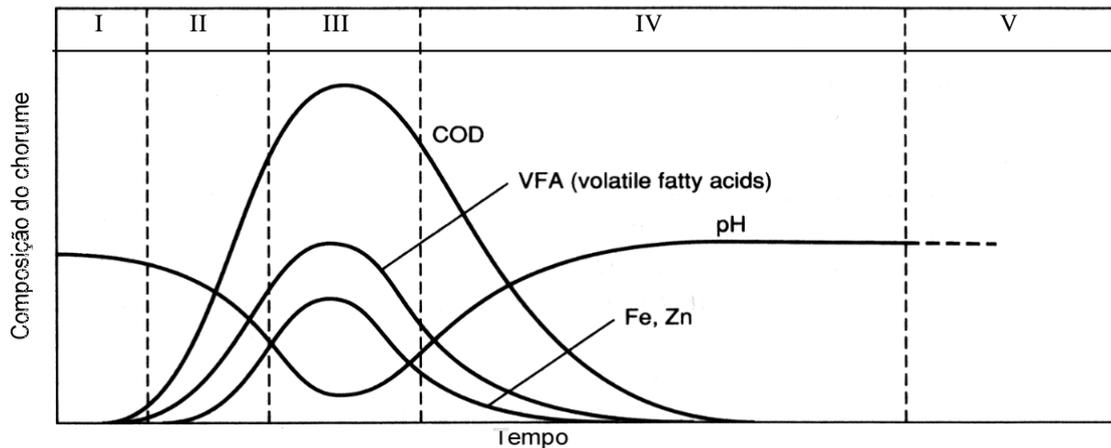


Figura 3-4: Variações das características do chorume em função do tempo e das fases de degradação e geração de gases (Tchobanoglous, 1993).

Contudo essa abordagem é genérica e ilustra bem a inter-relação entre as fases de degradação do aterro com a qualidade dos efluentes líquidos e gasosos. Na verdade a qualidade do chorume é variável a ser considerada dentro de intervalos mais curtos de tempo, tais como variações sazonais e mesmo mensais, além de dependente das características operacionais do aterro. Por outro lado, deve-se considerar qual abordagem será feita na concepção do aterro e no respectivo manejo de chorume, de forma a detectar quais variáveis são mais importantes.

Para mostrar a dependência da qualidade do chorume às variáveis operacionais e de projeto, Lu *et al.* (1984) desenvolveram curvas mostrando mudanças na concentração com o aumento da idade do aterro, empregando dados de vários outros aterros de diferentes idades. Os autores mostraram que as concentrações de vários componentes do chorume variavam consideravelmente. A idade do aterro foi considerada o fator mais relevante na composição do chorume.

Os tipos, quantidades e taxas de produção de contaminantes do chorume de aterros sanitários são influenciadas por vários fatores, incluindo tipo e composição do lixo,

densidade, seqüência de disposição, profundidade, umidade, temperatura, tempo e pré-tratamento. A quantificação mais precisa desses parâmetros e seus impactos, são complexos devido à heterogeneidade do lixo encontrado nos aterros. Os mecanismos e o alcance desses contaminantes liberados, assim como suas concentrações, não são de fácil previsão. Portanto é de extrema importância a aquisição e análise de dados de diferentes aterros, para que tais experiências possam ser aplicadas a novas situações.

Todavia, existem certas tendências para os níveis de concentração de contaminantes do chorume ao longo do tempo. Lu *et al.* (1984) efetuaram uma revisão extensa de pesquisas que abordavam a produção do chorume e respectivas concentrações de contaminantes. Os autores combinaram dados obtidos desses estudos, que resultaram em curvas similares às da Figura 3-5, para DBO₅, ferro (Fe), cloro (Cl), e nitrogênio amoniacal (N-NH₃).

Porém, as concentrações dos diversos componentes não se alteram com a mesma taxa para diferentes lugares, pois o tempo é apenas um dos fatores relevantes (o outro é a infiltração). Uma alternativa é utilizar o fluxo de entrada de umidade como a variável preponderante. Determinando-se as infiltrações de água, através de um modelo de balanço hídrico, é possível estimar a concentração dos contaminantes. Uma vez que as infiltrações transformam-se no chorume pela lixiviação, as concentrações desses compostos diminuem com o tempo.

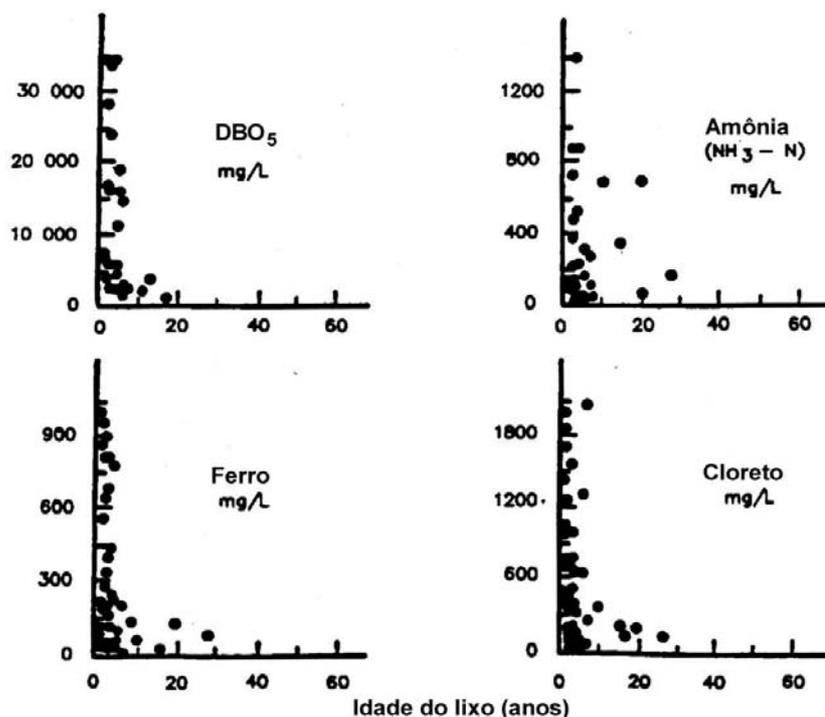


Figura 3-5: Variação da concentração de contaminantes do chorume com a idade do lixo. (Lu, Eichenberger e Stearns, 1985 citado por McBean *et al.*, 1995).

Reitzel *et al* (1992), a partir de estudos em lisímetros determinou, através da análise de regressão, algumas curvas exponenciais para variações dos parâmetros: cloretos, DQO, fosfato total, amônia, ferro, cádmio e chumbo. Para cada um desses parâmetros os autores correlacionaram a quantidade de líquidos adicionados por unidade de massa de resíduos em função do tempo. As funções obtidas, contudo, são de pouca aplicação prática, pois um aterro sanitário é composto por múltiplas células em diferentes estágios de degradação. Assim sendo, o uso dessas curvas deve levar em conta que para cada célula seja considerado o tempo a partir do momento em que a mesma foi preenchida.

Além das diversas variáveis existentes, outros fatores devem ser considerados, especialmente no Brasil, onde diversos locais de destinação final que não receberam *liners* adequados, em função da boa operação, são considerados aterros sanitários, mas apresentam uma série de deficiências de drenagem e controle do chorume. Além disso, o uso indiscriminado da recirculação promove alterações significativas no processo de degradação dos resíduos aterrados, assim como no chorume resultante.

Este fato, aliado à falta de pesquisas mais profundas sobre o tema no Brasil, implica no desconhecimento das características qualitativas médias do chorume advindo dos sistemas típicos de disposição de lixo doméstico existentes. Características estas, associadas também com o tipo de lixo doméstico gerado no país, bastante diferente daquele produzido em países do primeiro mundo, onde os sistemas e os estudos são mais consistentes.

Estudo de Cintra e Hamada (2002)

Estudos realizados por Cintra *et al* (2002), no aterro sanitário de Bauru, mostraram que a qualidade do chorume obtido no poço coletor apresenta variações significativas ao longo das amostragens efetuadas durante o período de seis meses.

Para as amostragens de chorume efetuados no período de estudo a DBO₅ variou de 1.050 mg/l a 18.320 mg/l, e a DQO entre 3.940 mg/l e 29.920 mg/l, como mostrado na Figura 3-6. Portanto, houve uma variação expressiva da DBO₅, acima de 1000%, e da DQO, acima de 500%, e estas estiveram correlacionadas aos índices pluviométricos, mostrado na Figura 3-7.

Outro dado relevante foi a queda do pH como resultado dos período de entrada das chuvas mais intensas, como mostrado na Figura 3-8. A redução dos valores de pH pode ser também correlacionada com o aumento da DBO₅ e da DQO.

Nessas análises verificou-se que a variação da qualidade do chorume é muito grande ao longo do ano, sendo dependente fundamentalmente das chuvas e da posição da frente de disposição, que ocorreram nas proximidades do tanque de coleta. Além disso os sistemas de contenção e de drenagem do aterro são muito precários, permitindo a infiltração do chorume no solo.

A qualidade do chorume nos meses de baixa pluviosidade manteve-se bastante uniforme, o que permite concluir que o mesmo resulta de sua estagnação ao longo dos meses de estiagem, atingindo relações DBO₅/DQO menores que 0,3, típicos de aterros antigos.

A estabilidade dos parâmetros DBO₅ e DQO nesse período não é propriamente representativa de uma massa nova de lixo, cujo chorume apresenta elevada concentração de material biodegradável.

Contudo, com a chegada das chuvas, o sistema de drenagem passou a capturar o chorume advindo da frente de disposição, que na época encontrava-se próximo ao poço de coletor, na parte frontal do aterro, o que elevou significativamente os valores de DBO₅, DQO e também a relação DBO₅/DQO.

Após essa elevação os valores de DBO₅ e DQO reduziram-se gradativamente, como resultado da intensa lixiviação ocorrida no início do período de chuvas e o pH se elevou concomitantemente.

Deste estudo concluiu-se que a qualidade do chorume não depende somente da vida útil do aterro, mas de eventos e atividades operacionais do aterro, tais como precipitação pluviométrica e localização frente de descarga. Depende também de fatores tais como eficiência do sistema de drenagem e da qualidade da impermeabilização da base.

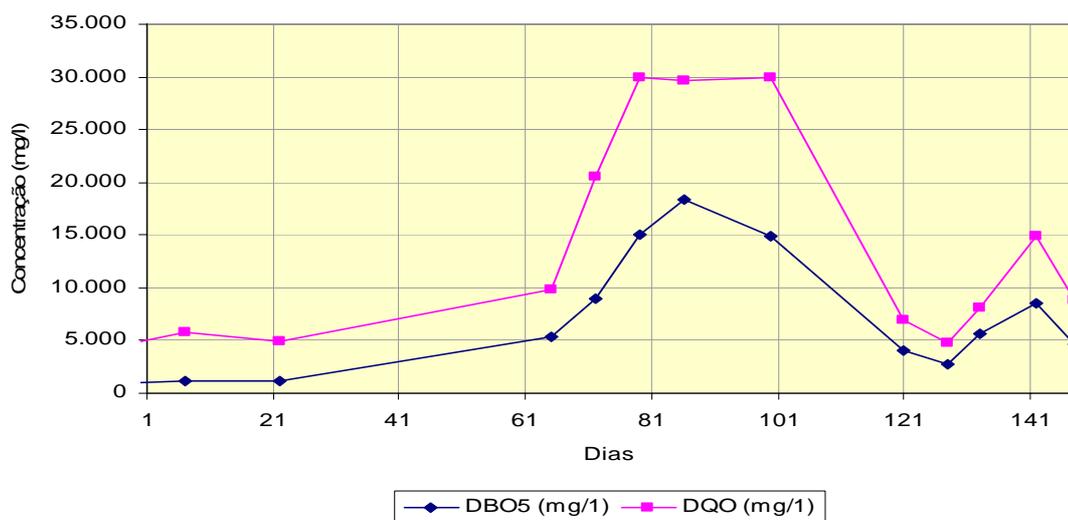


Figura 3-6: Valores de DBO₅ e DQO do chorume ao longo tempo no aterro controlado de Bauru.

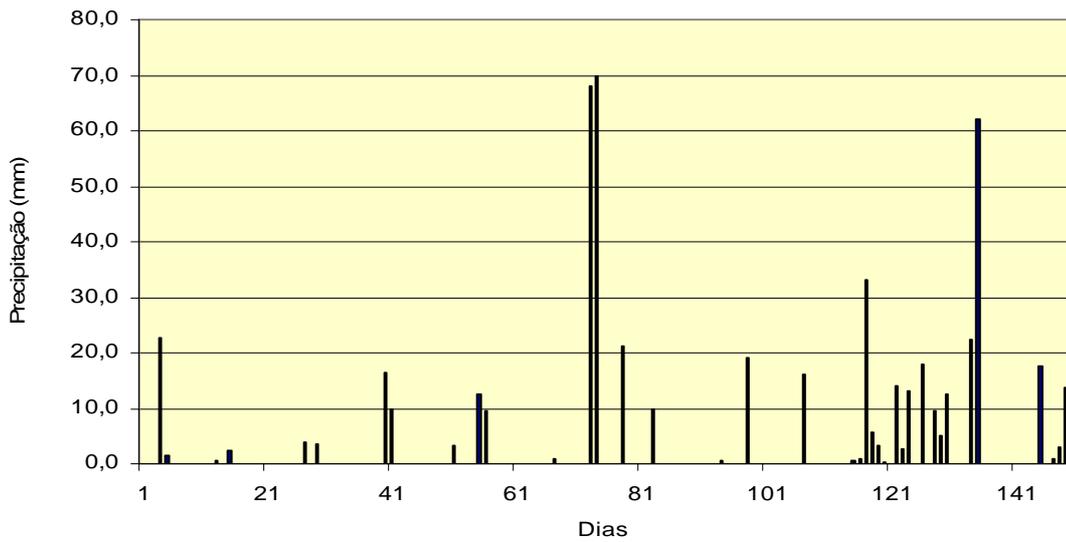


Figura 3-7: Registros de precipitação pluviométrica na região do aterro controlado de Bauru no período de amostragens de chorume.

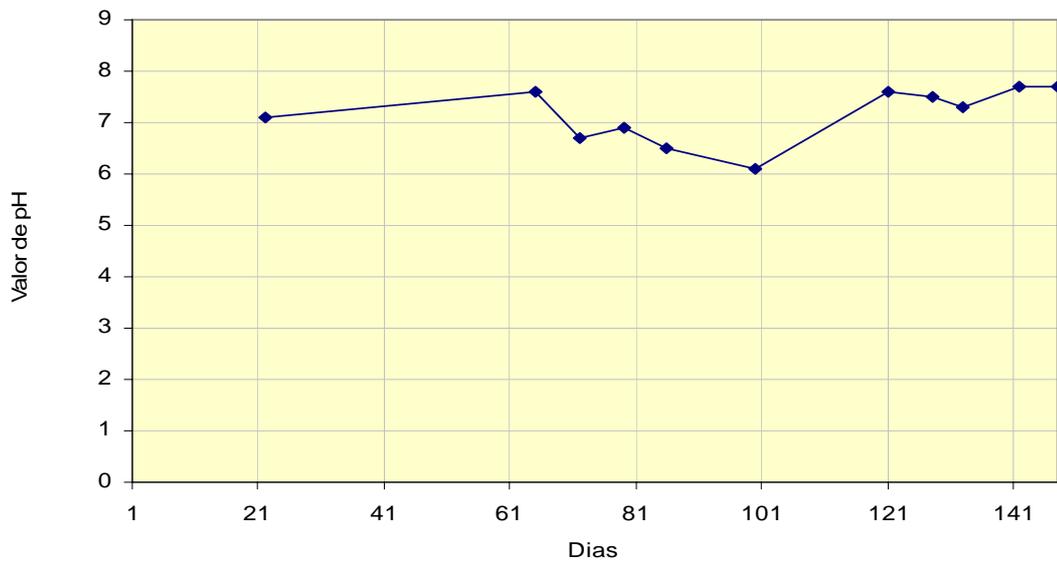


Figura 3-8: Valores de pH do chorume ao longo tempo no aterro controlado de Bauru.

3.3.2 GERAÇÃO

Balanco de Água em um Aterro Sanitário

Segundo Qasim e Chiang (1994), o fluxo de água por um aterro sanitário leva com ele vários materiais dissolvidos e suspensos. Geralmente, quanto maior os fluxos de água através

dos resíduos sólidos, mais contaminantes são carreados. Portanto é importante o conhecimento dos métodos que podem ser empregados para quantificar a geração de chorume. Para tanto, Pfeffer (1992), Fenn *et al* (1975), Dass *et al* (1977), Lu *et al* (1984), e Korfiatis e Demetracopoulos (1984), Remson *et al* (1968), citados por Qasim e Chiang (1994) e Tchobanoglous *et al.* (1993), abordam técnicas que utilizam a análise do balanço de água no aterro.

Para um aterro sanitário o balanço de água corresponde à soma de quantidades que entram e a subtração de quantidades de água que são consumidas nas reações químicas e a quantidade de água que deixa o aterro como vapor. O potencial, portanto, corresponde à quantidade de água que excede a capacidade de retenção de umidade da massa aterrada.

A água que entra no aterro é representada pela umidade contida na massa de lixo e cobertura diária e aquela resultante do balanço entre precipitação, evapotranspiração, e da capacidade de campo da camada de cobertura. As estimativas para o balanço de água de aterros sanitários podem ser efetuadas através de vários métodos. Lu *et al.* (1981 e 1984) elaboraram um resumo sobre as técnicas disponíveis para estimativa do volume de chorume. Este estudo resultou num total de 240 procedimentos diferentes para cálculos de geração de chorume. Fenn *et al.* (1975) e Dass *et al.* (1977), apresentaram uma análise do balanço de água, em que a fonte primária de líquidos no aterro é a precipitação. Uma parte dessa umidade resulta em escoamento superficial, uma parte é devolvida à atmosfera na forma de evapotranspiração do solo e das superfícies de plantas, e o resto se acrescenta ao armazenamento de umidade do solo. Sempre que a umidade excede a capacidade de campo do solo, a água, infiltra no interior do aterro.

A taxa de percolação de umidade no aterro depois que ultrapassar a capacidade inicial será igual à taxa de geração de chorume.

Fatores importantes que governam a taxa de percolação são precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração, e armazenamento de umidade no solo. Estes fatores são descritos na seqüência.

Precipitação

Precipitação inclui toda a água que cai da atmosfera sobre uma área considerada, podendo ocorrer de várias formas, tais como chuva, neve e granizo. Uma vez que a precipitação atinge uma superfície resultará em escoamento superficial, evaporação e infiltração.

A precipitação varia geograficamente e de acordo com a sazonalidade. O volume precipitado, às vezes, varia consideravelmente dentro de uma curta distância, então, devem ser obtidos dados de precipitação que efetivamente atingiram a área considerada. Portanto, as fontes de informação devem cobrir um grande número de setores e serem confiáveis.

Escoamento Superficial e Infiltração

O volume do escoamento superficial depende de fatores como intensidade e duração da chuva, do declive da superfície, da permeabilidade do solo, e da quantidade e tipo de vegetação. Existem vários métodos para se estimar tanto o escoamento, como a infiltração de água no solo.

O método mais usual considera o emprego de um coeficiente de escoamento superficial como um fator de proporcionalidade em relação à precipitação. Tal conceito é amplamente abordado no estudo da hidrologia.

Evapotranspiração

A quantidade de umidade disponível para evapotranspiração em um aterro é afetada pelo tipo de solo da cobertura e pela respectiva vegetação existente. Naturalmente, uma característica desejável num projeto de aterro sanitário é aumentar a evapotranspiração a fim de reduzir a produção de chorume (Dass et al. 1977).

A evapotranspiração em um determinado local ou é calculada ou medida. A medida da evapotranspiração real e sua extrapolação constituem prognósticos mais precisos em relação as reais perdas de água. Muitos autores propuseram métodos que permitissem estimar a evapotranspiração utilizando lisímetros e sistemas medidores de evaporação (Jens et al. 1949; Viessman et al. 1977; Linsley e Franzini 1979; Chow et al. 1988).

Muitas equações empíricas de evaporação/evapotranspiração foram propostas por vários pesquisadores. Veihmeyer (1964), citado por Qasin *et al* (1994) relatou uma discussão de métodos e equações sugeridas por Hedke, Lowry-Johnson, Blaney-Criddle, Blaney-Morin, Penman, Hargreaves, e Thornthwaite. Entre todos estes métodos e equações, os procedimentos fornecidos por Thornthwaite e Mather (1955, 1957) são os comumente aplicados. Este método utiliza valores tabelados de (a) índice de calor, (b) temperatura, e (c) fator de correção.

Pode-se, portanto, falar em métodos de estimativa e métodos de medida. Para se trabalhar com uma ferramenta computacional seria conveniente incluir um método de

estimativa, pois estes fornecem equações empíricas que poderão ser ajustadas no programa e, além disso, tais equações são regidas por dados comumente encontrados no Brasil e, portanto, de fácil acesso para o usuário. Em consequência dessa facilidade, o método mais apropriado para o cálculo da evapotranspiração potencial é o de Thornthwaite.

Thornthwaite (segundo Swami et al, 1978) estabeleceu uma equação para um mês de trinta dias, que correlaciona dados de evapotranspiração potencial, medida em evapotranspirômetros e em bacias hidrológicas, com dados de temperatura média mensal e comprimento do dia. A partir dessa correlação foi estabelecida a formulação que segue.

$$E = \left(\frac{10 \cdot t}{I} \right)^a \cdot 1,6$$

em que

E: evapotranspiração potencial não ajustada (cm);

t: temperatura média mensal (°C);

I: índice de calor, correspondente a soma de 12 índices mensais, tal que

$$I = \sum_1^{12} i, \text{ em que } i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}; \text{ e}$$

$$a = 0,675 \cdot 10^{-6} \cdot I^3 - 0,771 \cdot 10^{-4} \cdot I^2 + 1,792 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49$$

Armazenamento de umidade no solo

O conteúdo de umidade no solo muda continuamente: aumenta devido a infiltração e diminui devido a evaporação/evapotranspiração. A depleção de umidade devido a evapotranspiração é limitada a uma zona de solo superior definida pela profundidade da zona efetiva de raízes das plantas.

É importante considerar a mudança no armazenamento de umidade da cobertura de solo dos aterros no método do balanço de água. A máxima umidade que o solo pode reter contra a solicitação da força gravitacional é a *capacidade de campo*. A mínima umidade que o solo perde devido a vegetação é seu conteúdo de umidade de ponto de murchamento. A diferença entre os dois limites é a umidade que remata a capacidade disponível para as plantas do solo.

Quanto maior a umidade disponível, maior será a perda de umidade à atmosfera através de evapotranspiração. Inicialmente, o solo satura rapidamente até que a capacidade de campo seja alcançada. Atingida a capacidade de campo, o solo permanece essencialmente com aquele conteúdo de umidade a menos que a perca por outros modos.

O solo dentro da zona de raízes pode perder umidade consideravelmente através de evapotranspiração a conteúdos de umidade abaixo da capacidade de campo. Ao ponto de murchamento permanente, a umidade restante é essencialmente indisponível para ser retirada através de plantas.

3.3.3 TRATAMENTO DE CHORUME

A solução dos potenciais problemas pelo chorume coletado do aterro não se resume na escolha do processo de tratamento. Na realidade o termo que melhor se enquadra nesta questão é o *manejo do chorume* que constitui a chave para eliminação dos riscos potenciais de contaminação de aquíferos provocados por este efluente.

Diversas técnicas podem ser empregadas para manejo do chorume coletado dos aterros, entre as quais são destacadas por Tchobanoglous (1993): a) recirculação do chorume; b) evaporação; c) tratamento seguido de disposição; e d) disposição em estações de tratamento de esgotos domésticos.

A *recirculação de chorume* é aceita por diversos autores como um método a ser considerado para o tratamento de chorume. Justifica-se que durante os estágios iniciais de operação do aterro, o chorume contém quantidades significativas de sólidos totais dissolvidos, DBO₅, DQO, nutrientes e metais pesados. Quando o chorume é recirculado a concentração desses componentes é abrandada pela atividade microbiológica e por reações químicas e efeitos físicos que ocorrem dentro do aterro. Verificam-se assim, taxas de produção de gás significativamente maiores nesse tipo de sistema. O chorume residual deve ser coletado, tratado e disposto.

A *evaporação* tem sido uma das formas de manejo simplificado de chorume quando se empregam lagoas de evaporação (devidamente impermeabilizadas). O chorume residual, menos úmido, resultante do processo, é disposto em locais do aterro, parcialmente encerradas. Em locais de elevado índice pluviométrico, essas instalações devem ser cobertas. Em muitos casos esta técnica emprega equipamentos evaporadores através da queima de diesel ou GLP, sendo indicado também o próprio gás do aterro como fonte de energia. Neste caso, devem ser tomadas precauções quanto ao efluente gasoso.

O *tratamento de chorume* propriamente dito recorre a processos comumente empregados nos tratamentos de águas residuárias. Uma vez que as características dos chorume coletado variam bastante nos diversos casos, um bom número de opções pode ser empregado

para tratamento. Na Tabela 3-12 são apresentados os principais processos de tratamento, tanto físico/químico e biológico utilizados para o tratamento de águas residuárias, inclusive o chorume.

Uma alternativa que tem crescido proporcionalmente à disponibilidade de estações de tratamento de esgotos (ETE) é o co-tratamento do chorume nessas instalações. Normalmente a quantidade de chorume coletado nos aterros é bem menor que o volume tratado nas ETE's, de forma que mesmo apresentando uma concentração elevada de matéria orgânica, a diluição com o esgoto reduz significativamente o impacto sobre o processo. Apesar da conveniência, a concentração de determinados contaminantes, especialmente metais pesados, deve ser ponderada e monitorada.

Contudo, a escolha de uma alternativa para tratamento de chorume deve ser considerada mais profundamente, em função, principalmente da variação temporal da qualidade do chorume.

Na realidade, devido as variantes de tratamento para os diferentes componentes químicos do chorume, não deve ser surpresa a existência de diversas alternativas. Estas alternativas de tratamento, como apresentado, incluem processos biológicos aeróbios e anaeróbios e métodos físicos e químicos. Acrescenta-se ainda a possibilidade de recirculação do chorume para o aterro, como forma parcial de tratamento e posteriormente, a aspersão do chorume sobre o solo como forma de disposição final. O enfoque de uma alternativa de tratamento individual está normalmente direcionado para um determinado componente químico, portanto, com todo sistema sendo implementado em uma seqüência, encadeando coletivamente o tratamento dos diferentes contaminantes existentes no chorume.

A alternativa de tratamento a ser considerada para a aplicação em uma situação específica é função da qualidade requerida do efluente no lançamento. O tratamento in loco que permita o lançamento em um corpo d'água nas proximidades, necessariamente irá requerer um sistema mais abrangente e eficiente que aquele considerado preliminar para o lançamento em sistema público de coleta e tratamento, quando houver. Na Tabela 3-13 apresenta-se resumidamente as indicações de processos para tratamento dos principais constituintes do chorume.

Tabela 3-12: Processos representativos para tratamento de águas residuárias, inclusive o chorume, baseado em Metcalf & Eddy (1991).

Processo de Tratamento	Aplicação	Observações
<i>Processos biológicos</i>		
Lodos ativados	Remoção de componentes orgânicos	Necessita de decantador
Sequência de reatores “batch”	Remoção de componentes orgânicos	Similar ao de lodos ativados, porém sem decantador (somente para pequenas vazões)
Lagoas aeradas	Remoção de componentes orgânicos	Requer muita área
Sistemas baseados em películas biológicas	Remoção de componentes orgânicos	Mais indicado para efluentes industriais
Sistemas anaeróbios (lagoas e reatores)	Remoção de componentes orgânicos	Baixos consumo de energia e produção de lodo; em climas muito frios requer aquecimento; riscos de instabilidade, principalmente na partida
Nitrificação/desnitrificação	Remoção de nitrogênio	Dependendo do sistema pode ser aplicado conjuntamente aos sistemas de remoção de componentes orgânicos.
<i>Processos químicos</i>		
Neutralização	Controle de pH	Aplicação limitada
Precipitação	Remoção de metais e alguns ânions	Gera lodo que deve ser disposto como resíduos perigoso
Oxidação	Remoção de componentes orgânicos	Mais indicado para águas residuárias diluídas e o uso de cloro pode gerar hidrocarbonetos clorados
Oxidação com vapor saturado	Remoção de compostos orgânicos	Custoso
<i>Operações físicas</i>		
Sedimentação/flotação	Remoção de sólidos suspensos	Aplicação limitada se aplicado isoladamente, porém pode ser útil em conjunto com outros processos.
Filtração	Remoção de sólidos suspensos	Útil somente no refinamento do processo
“Air Stripping”	Remoção de amônia ou compostos orgânicos voláteis	Necessita de equipamento para controle de poluição atmosférica
Adsorção	Remoção de componentes orgânicos	Custos elevados, e ainda em testes
Troca iônica	Remoção de compostos inorgânicos dissolvidos	Útil somente no refinamento do processo
Evaporação	Quando a descarga de chorume não é permitida	Resulta em lodo que pode ser perigoso, e pode ser custoso em regiões não áridas.

Tabela 3-13: Processos de tratamento para os principais constituintes do chorume (McBean *et al*, 1995).

Constituinte	Características gerais	Processo de Tratamento Provável
Substâncias orgânicas em elevadas concentrações	<p>Chorume novo (DBO≈10.000 mg/l)</p> <ul style="list-style-type: none"> – Na forma de ácidos graxos – Viável ao tratamento biológico, retendo-se qualquer inibição tóxica <p>Chorume velho (DBO abaixo de 1.000 mg/l e DQO acima de 1.000 mg/l)</p> <ul style="list-style-type: none"> – Na forma ácidos húmicos e fúlvicos 	<ul style="list-style-type: none"> – Tratamento biológico – Adsorção (ex: carvão ativado)
Nitrogênio amoniacal	<ul style="list-style-type: none"> – Acima de 1.000 mg/l 	<ul style="list-style-type: none"> – Nitrificação/desnitrificação biológica – Cloração ao Breakpoint – Troca iônica
Metais pesados	<ul style="list-style-type: none"> – Em dezenas e centenas (mg/l) – Fe principalmente, Zn, Pb, Cu 	<ul style="list-style-type: none"> – Precipitação química – Tratamento bioquímico
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> – Em dezenas (mg/l) 	<ul style="list-style-type: none"> – Adição suplementar, necessária ao tratamento biológico
PH	<ul style="list-style-type: none"> – O chorume é geralmente ácido 	<ul style="list-style-type: none"> – Neutralização por cal ou hidróxidos
Íons conservativos	<ul style="list-style-type: none"> – Cl^- e SO_4^{-2}, K^+ e Na^+ em milhares (mg/l), altas concentrações de sólidos dissolvidos são comuns no chorume. 	<ul style="list-style-type: none"> – Osmose reversa e ultrafiltração

3.3.3.1 Tratamento Biológico

A ênfase do tratamento biológico é alterar a forma dos constituintes orgânicos, contudo isto ocorre pela conversão biológica, podendo produzir grandes quantidades de lodo, que irá requer sua subsequente disposição.

Para o chorume com uma relação DBO/DQO elevada (acima de 0,40) recomenda-se o tratamento biológico aeróbio ou anaeróbio, sejam estes com microrganismos em suspensão ou com meio suporte. No primeiro caso enquadram-se as lagoas de estabilização, lagoas aeradas e lodos ativados. No segundo caso, enquadram-se os filtros biológicos e os discos rotativos de contato.

3.3.3.1.1 Tratamento Aeróbio

Os ácidos graxos produzidos pela decomposição anaeróbia existente no interior do aterro, são facilmente biodegradáveis através do processo aeróbio, desde que consideradas limitações de toxicidade. Contudo em função da elevada concentração, requerem grandes quantidades de oxigênio e como consequência, enormes quantidades de biomassa, que devem ser posteriormente dispostas. Essas considerações são fundamentais, especialmente para o chorume novo.

Quando se trata, porém de um chorume mais antigo, ou de um aterro mais estabilizado, a fração orgânica, embora seja significativa, é constituída por material pouco biodegradável, sendo nesta situação, pouco indicado o tratamento biológico.

Como se sabe, em virtude principalmente das variações climáticas, o chorume apresenta uma carga orgânica bastante variável, necessitando adaptações ao sistema variando a capacidade de suprimento do ar.

Um tratamento biológico tem uma papel importante na incorporação do nitrogênio amoniacal à biomassa, ou então, durante o tratamento aeróbio, ocorre a oxidação do nitrogênio amoniacal. Isto sugere a introdução prévia de um sistema anaeróbio, seguido de um aeróbio.

Lagoas Aeradas

As lagoas aeradas são dotadas de uma série de unidades de aeração mecanizada ou por difusores de ar, promovendo a mistura e introduzindo oxigênio. Estudos realizados por Chian e deWalle (1977), mostraram algumas limitações das lagoas areadas, cujo o efluente apresentava ainda concentrações elevadas de material orgânico estável de elevado peso molecular, muito parecido com o chorume advindo de aterros relativamente estabilizados. Resultados de estudos realizados com lagoas aeradas, no tratamento de chorume são mostrados na Tabela 3-14.

Tabela 3-14: Resultados do tratamento de chorume em lagoas aeradas (escala piloto)

Autoria	DBO (mg/l)		Temp. (°C)	Tempo de detenção (dias)	Observações
	Afluente	Efluente			
Booye & Ham (1974)	2.900	200	24	5	Problemas com espuma
Cook & Foree (1974)	7.100	26	22	10	Adição de cal+fosfato
Uloth & Mavinic (1977)	36.000	32	20	20	Adição de N+P e problemas com espuma
Chian & deWalle (1977)	35.200 (DQO)	1.030 (DQO)	24	7	Adição de P, ácidos tânico e fúlvico
Zapf-Gilje (1979)	13.600	26	25	6	

Lodos Ativados

O sistema de lodos ativados caracteriza-se fundamentalmente pela recirculação do lodo, sendo que o tempo de detenção hidráulico é consideravelmente menor que em lagoas aeradas, com retenção de bactérias entre três a cinco vezes maior. Alguns estudos, empregando-se lodos ativados para tratamento de chorume em escala real, descritos por Ehrig (1989), demonstraram um efluente com DBO₅ de 254 mg/l para um afluente de 5.294 mg/l, e em termos de DQO, corresponderam a 1.566 e 12.359 mg/l, respectivamente.

Além da redução da DBO₅, obtém-se a nitrificação, como um aspecto importante do tratamento por lodos ativados. Essas características tornam-se mais importantes com o envelhecimento do aterro e conseqüente aumento na geração de compostos nitrogenados. Durante a aeração o pH se eleva, alterando o equilíbrio para amônia na forma livre. Nestes casos podem ocorrer efeitos inibitórios sobre as bactérias nitrificantes.

A sobrecarga durante a degradação do nitrogênio resulta na nitrificação parcial, com acúmulo de nitrito no sistema. Recomenda-se que se utilize da desnitrificação como forma de se reduzir o nitrato no efluente, assim como garantir maior estabilidade do pH no sistema (a nitrificação é um processo que reduz o pH).

Filtros Biológicos ou Discos Rotativos de Contato

Uma das vantagens anunciadas para este tipo de sistema com meio suporte para a biomassa (biofilme), é a maior tolerância aos choques de carga, tanto hidráulico como químico, que são muito comuns quando se trata do chorume. Contudo, verifica-se, principalmente nos discos de contato, uma tendência de obstrução do leito pela presença de depósitos de cálcio, impedindo o desenvolvimento da biomassa.

Comparativamente ao sistema de lodos ativados, os sistemas de biofilme consomem menor quantidade de energia, sendo porém limitados quanto à capacidade de tratar o chorume com elevadas concentrações de material orgânico, principalmente pela obstrução dos vazios e redução da oxigenação.

Estudos de Knox (1985) demonstraram bons índices de nitrificação em filtros biológicos até a valores de 2,0 gN/m².dia, sendo que a partir deste valor verificou-se um acúmulo de nitrito no sistema. De fato, em termos de tratamento de águas residuárias os filtros biológicos apresentam boa eficiência na nitrificação.

Aspectos Negativos do Tratamento Aeróbio

McBean e *et al* (1995), descrevem diversas características negativas no emprego do tratamento aeróbio para o chorume.

- O tratamento aeróbio não funciona bem na presença de metais tóxicos, tais como Cu, Na e Ni, que inibem principalmente a nitrificação.
- Normalmente a relação DBO₅/P no chorume está abaixo de 100, requerendo a adição suplementar de fósforo.
- A formação de espuma durante a aeração tem sido frequentemente reportado, necessitando o emprego de mecanismos para sua eliminação.
- Existe um potencial para a formação de CaCO₃ e/ou precipitação de ferro, que causam problemas operacionais para os equipamentos de aeração.
- Existe um potencial para formação de grandes quantidades de nitrogênio amoniacal, e se isto ocorrer, a nitrificação pode ser inibida. Nesta situação a concentração de amônia deve ser reduzida por meios físico-químicos, antes de se proceder a nitrificação. Também, a presença de metais inibidores específicos, podem requerer um pré-tratamento.

- A oxigenação exige elevado consumo de energia, que durante a vida do sistema de tratamento pode significar um custo de operação e manutenção muito acima do custo de implantação.

3.3.3.1.2 Tratamento Anaeróbio

A atividade biológica anaeróbia ocorre no processo natural de degradação no interior do aterro. Esse processo anaeróbio pode ter a continuidade em um sistema de tratamento de chorume.

Em um sistema de tratamento de águas residuárias, as moléculas orgânicas complexas no afluente são fermentadas por bactérias à ácidos graxos voláteis, principalmente acético, propiônico e butírico. Estes são convertidos em metano e dióxido de carbono pelas bactérias metanogênicas, resultando em uma baixa produção de sólidos biológicos.

Uma desvantagem conhecida do processo anaeróbio é que os microrganismos, principalmente as bactérias metanogênicas, são inibidas pelo meio ácido e são sensíveis à presença de alguns metais. Estas inibições podem causar uma redução na taxa de crescimento e conduzir ao carreamento da rede de células microbianas em sistemas de mistura completa. Este problema normalmente é solucionada com a adição de uma solução tampão ou pelo emprego de filtros anaeróbios, para retenção de biomassa. Os filtros anaeróbios tem-se mostrado mais eficientes que os digestores, principalmente pela redução do carreamento da biomassa. Na Tabela 3-15 apresenta-se os resultados de estudos com filtros anaeróbios e similares (biomassa fixa ou biofilme).

Tabela 3-15: Exemplos de eficiência de tratamento empregando reatores de filme fixo (McBean *et al*, 1995).

Autores	DQO (mg/l)	Remoção de DQO (%)	Meio suporte
Chian e deWalle (1977)	54.000	95	Carvão granular
Henry et al. (1985)	2.000	91	Filme plástico
Soyupack (1979)	5.800	90	Areia
Wright et al (1985)	22.800	97	Anéis plásticos

Outros trabalhos sobre tratamento anaeróbio, como descritos por Kennedy e Guiot (1986), demonstram que sistemas como filtros podem operar com tempos de detenção

menores que 24 horas, considerando-se cargas orgânicas variando entre 11 e 70 kg (DQO)/(m³.dia) e eficiências entre 50 e 90%. Beard e McCarty (1983), concluíram que sistemas de manta de lodo para tratamento de chorume com tempo de detenção de 1 dia e para cargas orgânica média de 15 kg (DQO)/(m³.dia) promovem um tratamento eficiente, sem necessidade de tamponamento e empregando a recirculação de chorume. Ainda, estudos de Lema *et al* (1988) com diversos sistemas anaeróbios demonstraram sua viabilidade e eficiência, como apresentado na Tabela 3-16.

Tabela 3-16: Resumo de levantamentos realizados por Lema *et al* (1988), para alguns sistemas anaeróbios de tratamento de chorume.

Tipo de reator	DQO do chorume (mg/l)	Temperatura (°C)	Tempo de detenção (dias)	Remoção de DQO (%)
Manta de lodo	25 - 35	33 - 35	0,3 - 0,5	80 - 90
Filtro anaeróbio	13,8	21 - 25	2 - 4	68 - 95
Filtro anaeróbio	3,8	21 - 25	0,5 - 1	60 - 95
Filtro anaeróbio	1,9	21 - 25	0,5 - 1	88 - 90

Os sistemas anaeróbios para tratamento de chorume apresentam muitas vantagens sobre o tratamento aeróbio. As vantagens incluem a geração do gás metano como subproduto e a baixa produção de lodo biológico na forma de lodo ou material em suspensão. Além disso o sistema não requer a introdução de equipamentos de aeração, e, conseqüente, considerável consumo de energia.

Além da manutenção de temperaturas adequadas, que não representam problema para a maior parte do Brasil, o sistema deve ser projetado cuidadosamente para não permitir sua obstrução.

Dentre as desvantagens que podem ser citadas, incluem-se as descritas na sequência.

- Exigência de temperaturas entre 15 e 35°C.
- Tempos de detenção relativamente longos
- Remoção incompleta de matéria orgânica
- Redução limitada de nitrogênio amoniacal

Se a concentração de DBO₅ é muito alta, a aplicabilidade do processo de tratamento anaeróbio torna-se uma grande vantagem devido ao baixo consumo de energia.

Contudo, a combinação de tratamento anaeróbio, seguido de um aeróbio é freqüentemente a melhor alternativa, de acordo com o esquema apresentado na Figura 3-9.

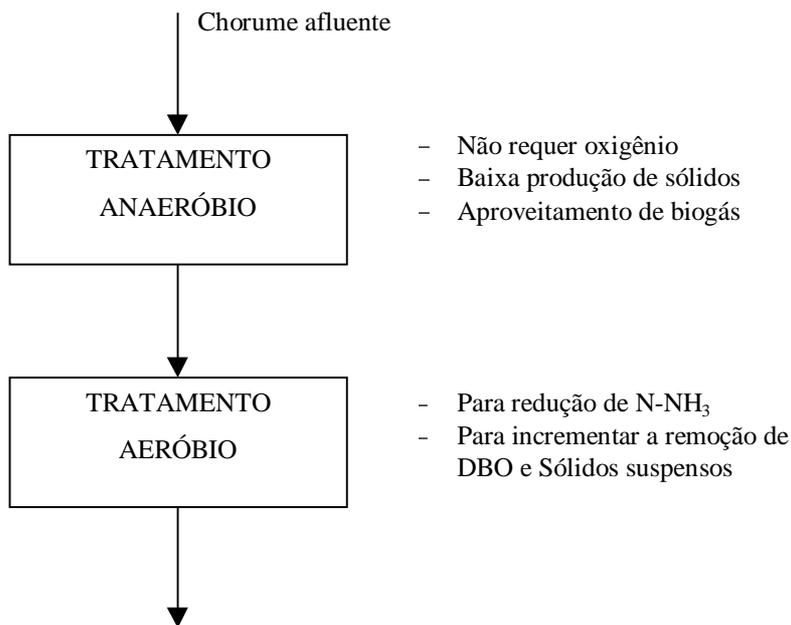


Figura 3-9: Combinação de tratamento aeróbico e anaeróbico (McBean *et al*, 1995).

Os efluentes de sistemas de tratamento anaeróbico de chorume são normalmente similares ao chorume de aterros antigos, ou seja com relação DBO/DQO menor que 0,3, sendo que a DQO atinge valores entre 1.000 e 3.000 mg/l e um conteúdo de nitrogênio amoniacal relativamente alto, entre 500 e 1.000 mg/l. Por isso as características do efluente dos sistemas anaeróbios não são suficientes para se permitir seu lançamento nos corpos receptores.

3.3.3.2 Tratamento Físico e Químico

Conforme o aterro sanitário vai se estabilizando bioquimicamente, há um decréscimo da quantidade de compostos biodegradáveis existentes no chorume. A eficiência de um sistema biológico de tratamento decresce na mesma proporção, demandando tratamento físico ou químico. Para McBean *et al* (1995), esta última alternativa como única no processo somente se aplicaria a chorume considerado muito antigo.

Dentre os processos aplicáveis podem ser citados: filtração em leito granular, adsorção por carvão ativado, ultrafiltração, precipitação química e coagulação, troca iônica, oxidação química e osmose reversa.

Na *filtração granular* o objetivo é a remoção de sólidos suspensos, indicada para ser aplicada antes da adsorção por carvão ativado. Em alguns casos a filtração se aplica a efluentes de tratamento biológico.

Normalmente o processo de *adsorção por carvão ativado* ocorre em colunas, através de fluxo ascendente ou descendente. O emprego da adsorção por carvão ativado não é indicado para chorume novo devido a baixa afinidade do carvão com ácidos voláteis. Assim, este processo é indicado para o chamado chorume “velho”, em que há predominância de substâncias húmicas.

A *ultrafiltração* é um meio eficiente para remoção de moléculas de elevado peso molecular existente no chorume. Porém aquelas de pesos moleculares menores freqüentemente passam pelo filtro.

Quando o chorume é tratado biologicamente, os metais pesados são removidos na forma de sulfetos metálicos no processo anaeróbico e como hidróxidos metálicos no processo aeróbico. Porém quando a concentração desses metais é elevada a precipitação química é indicada. Normalmente empregam-se a cal ou então oxidantes fortes. Embora pouco eficiente, a precipitação com cal consegue remover moléculas de elevado peso molecular. A coagulação com sulfato de alumínio ou cloreto férrico tem se mostrado pouco eficiente na remoção de DQO, além de exigir altas concentrações de coagulante, gerando elevados volumes de lodo.

A *osmose reversa* é um processo de separação por membranas, que pode ser aplicado em determinadas situações. Da mesma forma que na ultrafiltração, sugere-se o emprego prévio de tratamento biológico. Apesar da boa eficiência um dos maiores problemas é rápida colmatação.

Na oxidação química são empregados com freqüência tanto o cloro como o ozônio. Nos diversos estudos realizados, mostrados a seguir, verifica-se baixa eficiência no processo. A preferência recai sobre o hipoclorito de cálcio. O ozônio por sua vez não é indicado para chorume “novo”, devido a grande resistência de ácidos graxos ao ozônio.

O processo de *troca iônica* é dependente do tipo de matéria orgânica predominante no chorume do tipo de resina empregada. No geral observa-se boa eficiência deste processo em efluentes de tratamento biológico, com melhores resultados para os aeróbios.

3.3.3.3 Estratégia para Tratamento do Chorume

Devido à cadeia de constituintes existentes no chorume, não se deve considerar uma solução única de tratamento. Ao invés disso, emprega-se uma combinação de processos, com cada um representando uma função específica no tratamento de chorume.

Para determinar quais componentes são necessários, deve-se observar uma série de etapas essenciais, como descrito na sequência.

1. Estimar a vazão de chorume utilizando algum método de balanço hídrico.
2. Estimar a concentração de contaminantes em função da idade do aterro
3. Identificar as opções de tratamento e disposição, considerando-se a qualidade do chorume, limitações de lançamento e custos
4. Selecionar o sistema de tratamento e disposição que reflita as incertezas operacionais e respectiva flexibilização.

Alguns autores, como Forgie (1988) sugerem um critério para permitir a decisão na seleção de processos. Quando o chorume apresentar DQO elevada (acima de 10.000 mg/l), baixa concentração de nitrogênio amoniacal e uma relação DBO/DQO entre 0,4 e 0,8, e uma concentração significativa de ácidos graxos voláteis de baixo peso molecular, o tratamento pode ser efetuado por ambos os processos, ou seja anaeróbio e aeróbio. O tratamento físico-químico neste caso não é indicado.

Quando o chorume não apresenta as características representativas de um aterro novo, com DQO entre 1.500 e 3.000 e relações DBO/DQO menor que 0,4, presume-se que houve um decréscimo significativo de sua fração orgânica biodegradável. Neste caso, espera-se também uma elevada concentração de nitrogênio amoniacal. Isto significa que, tanto o tratamento aeróbio como anaeróbio podem ser limitados na remoção desses compostos orgânicos. Porém para remoção do nitrogênio amoniacal, o tratamento aeróbio pode ser indicado, auxiliando inclusive na remoção de DBO remanescente.

Quando a relação DBO/DQO tornar-se muito baixa, inferior a 0,1, a provável concentração de ácidos graxos voláteis será muito baixa, o que indicaria preferencialmente um processo físico-químico.

Genericamente, McBean *et al* (1995) sugerem sequências possíveis para tratamento, com indicações e pontos de entrada e lançamento, como apresentado na Figura 3-10.

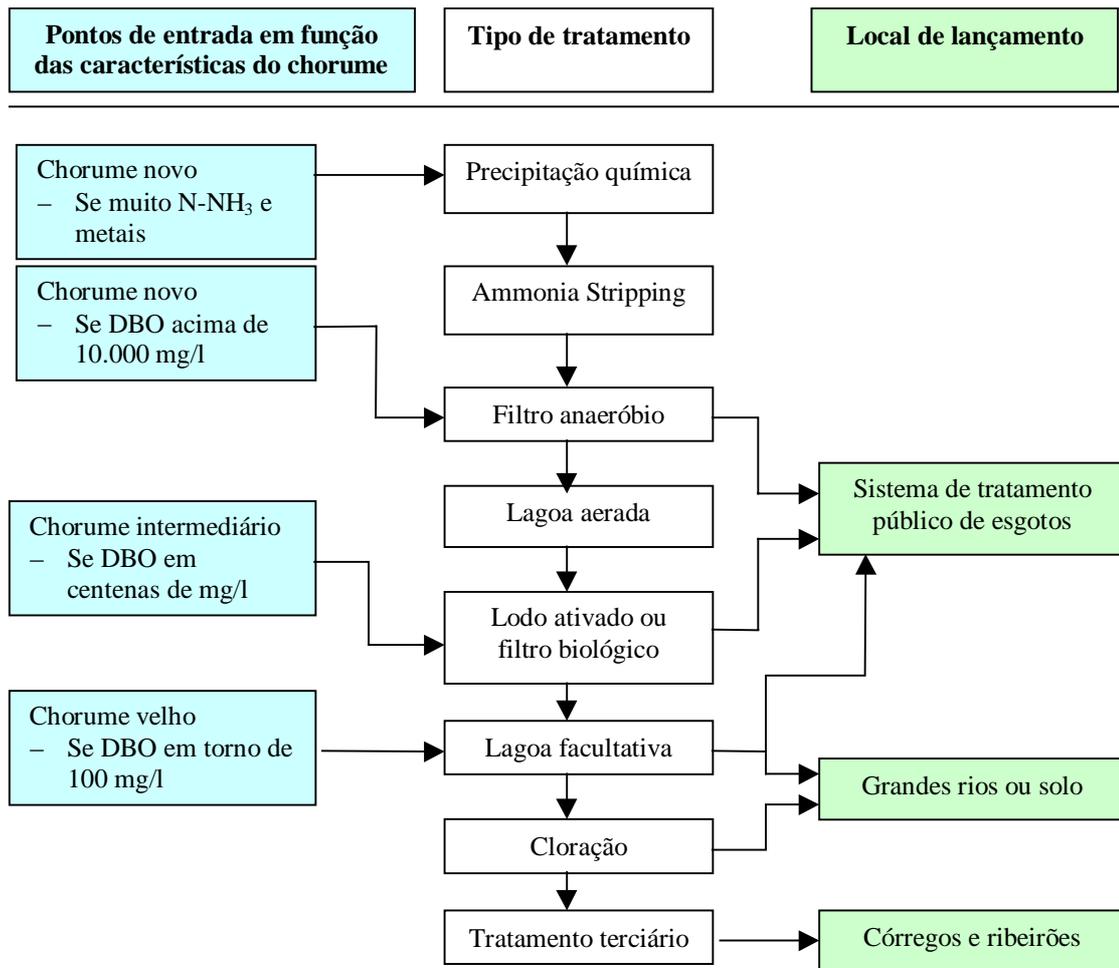


Figura 3-10: Seleção de processos para tratamento de chorume (McBean *et al*, 1995)

Como regra geral, podem ser descritas algumas justificativas para as definições indicadas para os processos de tratamento.

Se necessário, realiza-se um pré-tratamento com soda cáustica (NaOH), empregada para ajustar o pH e precipitar metais pesados. Elevadas concentrações de cálcio no chorume bruto não indicam o emprego de cal. Justifica-se o uso do NaOH por promover a precipitação de cálcio, ferro e manganês. A elevação do pH também favorece o surgimento de amônia na forma molecular, facilitando sua eliminação no processo.

1. Processos anaeróbios, especialmente os filtros anaeróbios, são empregados para reduzir a elevada carga orgânica.
2. Lagoas aeróbias são empregadas para incrementar a remoção de DBO, amônia e material em suspensão.
3. Os tanques de equalização são empregados para controlar o fluxo afluente ao sistema de tratamento, reduzindo as variações resultantes do balanço hídrico.

4. Nos casos em que se emprega o NaOH para alterar o equilíbrio dos componentes amoniacais ou promover a precipitação de metais, torna-se necessária a correção do pH pela adição de ácidos.

Quando se trata de aterro novo, a implantação ocorre de forma concomitante ao sistema de tratamento, desta forma o chorume que irá alimentar o sistema durante os primeiros anos, apresenta-se com as características típicas de chorume novo, ou seja: elevada concentração de compostos orgânicos biodegradáveis (ácidos graxos de baixo peso molecular), como característica principal. Desta forma o emprego de um sistema anaeróbio é altamente recomendável, nesta etapa. Dentre as alternativas para o tratamento anaeróbio, recomenda-se o emprego de filtros anaeróbios, pela capacidade de retenção de sólidos e eficiência comprovada.

Em virtude das limitações de eficiência descritas para o sistema anaeróbio, e a produção de elevadas concentrações (as vezes limitantes) de nitrogênio amoniacal, o emprego de um processo aeróbio na seqüência torna-se necessário para garantir uma melhoria considerável na qualidade do efluente final. Neste caso, um dos sistemas mais versáteis, que permite a flexibilização requerida para as variações de fluxo esperadas, é a lagoa aeróbia, que através do acionamento de determinados aeradores de superfície (os mais indicados), permitem uma oxigenação proporcional ao requerido para a degradação da matéria orgânica proveniente dos reatores anaeróbios. Adiciona-se a esta capacidade, a opção da recirculação do lodo como forma de combate à picos de carga orgânica.

3.4 UTILIZAÇÃO DO SOLO COMO ELEMENTO DEPURADOR

A disposição de águas residuárias no solo, principalmente os esgotos domésticos, é uma prática bastante antiga, sendo considerada uma importante alternativa de tratamento, a qual, assim como na autodepuração em corpos d'água e nos demais tipos de tratamento natural, compreende processos físicos, químicos e biológicos de remoção de carga poluidora.

Conforme Descrito por Paganini (1997), para compreendê-los é preciso ter-se presente que o solo é um meio físico formado por substâncias minerais e orgânicas, cujas formas predominantemente granulares conferem-lhe propriedades características como a porosidade, a permeabilidade, a textura e outras que o tornam o hábitat natural de um grande número de seres vivos microscópicos, vegetais e animais.

A matéria orgânica morta decompõe-se ao atingir o solo, no processo de alimentação dos organismos que nele estão presentes e tem assim sua sobrevivência assegurada. As substâncias mais simples daí resultantes repõem o estoque de sais minerais que contêm os macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e outros) e os micronutrientes (ferro, manganês, zinco, cromo e outros) utilizados pelas plantas, os quais, juntamente com a água e o gás carbônico, permitem a síntese da matéria orgânica pela vegetação através da fotossíntese. Dessa forma, a matéria orgânica realimenta o solo e transforma-se novamente em matéria orgânica viva. Se ao morrer não se incorporar ao solo, ou porque dele é retirada pela colheita, ou porque ele ou produtos de sua decomposição são carregados pelas águas (erosão e lixiviação), a tendência é a exaustão desse solo, com perda de sua fertilidade e capacidade de produção.

Por outro lado, a superalimentação do solo, pela adição de matéria orgânica em excesso além daquela que ele tem condições de renovar, provoca um aumento demasiado na concentração de um grande número de substâncias resultantes da decomposição, que acaba por tornar-se nociva à vida que nele se processa, reduzindo-a, não por falta de alimentos, mas por indigestão.

Pelo menos quatro propriedades do solo são extremamente importantes para sua utilização como para disposição:

a) **Capacidade de troca iônica:** representa a quantidade total de cátions e ânions que são absorvidos por unidades de peso no solo. Solos úmidos possuem capacidade de troca de cátions entre moderada e grande, mas capacidade limitada para troca de ânions. É importante salientar que a capacidade que um solo possui de reter os íons metálicos trazidos pelos esgotos, e impedi-los de atingir as águas superficiais e/ ou subterrâneas, bem como os tecidos vegetais, depende em grande parte de sua capacidade de troca iônica.

b) **Capacidade tampão:** provém de diversos fatores; solos carbonatados tamponados para um pH igual ou maior que 7 inibem a solubilidade dos metais pesados.

c) **Filtrabilidade do solo:** refere-se a sua eficiência como um filtro (físico) de partículas em suspensão. A filtração de organismos patogênicos provenientes do esgoto é um elemento importante para o processo de utilização de sua disposição em áreas agrícolas. Solo permeáveis de textura intermediária possuirão um conteúdo coloidal suficiente para aprisionar ou reter partículas, e constituem-se nos melhores filtros.

d) **Microbiologia do solo:** ocorrem transformações microbiológicas como os esgotos dispostos sobre o solo. Tais transformações envolvem a utilização de microrganismos, a fim

de transformar alguns compostos que contém os elementos essenciais ao desenvolvimento das plantas, como por exemplo, o nitrogênio, o fósforo, o enxofre e o carbono.

Essas quatro propriedades são os resultados de vários fatores, cuja interação, com reflexos sinérgicos ou inibitórios, fixará as propriedades do solo como um todo.

3.4.1 Método de infiltração

Esse processo de disposição de esgotos no solo, conforme descrito por Paganini (1997), é similar aos filtros intermitentes de areia, onde a maior porção dos esgotos infiltra-se no solo, ou a ele incorpora-se, embora uma parte evapore diretamente à atmosfera. A aplicabilidade da infiltração rápida depende de o solo apresentar uma camada espessa acima do lençol freático, mais do que naquele método, entretanto são exigidas grandes permeabilidades e boas características de drenagem, para que se tornem viáveis as elevadas taxas de aplicação normalmente empregadas.

Na aplicação dos esgotos feita normalmente por inundação, são preferíveis os terrenos de topografia plana ou pouco ondulada, sem grandes declividades, até cerca de 4 a 6% de acordo com o tipo de solo e a exigência ou não de vegetação protetora. A utilização de um solo por longo período para infiltração rápida de esgotos é mais favorecida quando estes são submetidos a uma decantação prévia, a fim de que seja removida parte dos sólidos presentes no esgoto bruto.

As taxas médias de aplicação de esgotos são definidas pela capacidade de infiltração, pelas condições de drenagem e pelo tempo de secagem após cada aplicação. Uma grande variação de taxas é encontrada na literatura desde 150 a 5000 m³ / ha x dia, porém em pesquisa realizada numa estação experimental em Torres (RS) constatou-se que taxas superiores a 450 m³ / ha x dia para esgotos com tratamento preliminar são muito elevadas, conduzindo à colmatação muito rapidamente.

O tempo de secagem destinado à aeração do solo é conseguido pelo parcelamento da área a ser utilizada e a aplicação dos esgotos em rodízio alternadamente. Lagoas de equalização de vazão podem tornar-se necessárias, considerando-se a grande flexibilidade operacional que conferem a um sistema de infiltração no solo.

3.4.2 Percolação

O movimento descendente da água no solo abaixo de sua superfície, e que ocorre na zona saturada, é referido como percolação e ocorre em duas fases distintas (água e meio solo), sendo regido somente pelas forças da gravidade. Como a percolação ocorre na zona saturada, o movimento é governado pelos mesmos parâmetros que regem o fluxo do lençol subterrâneo e pode, portanto, ser descrito pela equação de Darcy.

$$(V = Q / A)$$

onde:

V = velocidade (m/s)

Q = vazão (m³ / s)

A = área (m²).

Quando a percolação acontece em meio não saturado, ela ocorre essencialmente através de duas fases, já que líquido e gás (água e ar) ocupam concomitantemente os poros do solo. Enquanto solução geral, não existe uma equação disponível que represente o movimento; entretanto, trabalhos experimentais têm indicado que, para o caso de fluxo unidirecional, uma modificação da equação de Darcy pode ser usada com bons resultados.

A modificação consiste na introdução de um fator que reduz a permeabilidade específica; esse fator é função da percentagem de saturação do solo.

Em ambos casos, fluxo saturado e não saturado, a percolação depende da permeabilidade, e a permeabilidade depende do tamanho dos poros e da estrutura do solo, sendo função direta, portanto, do tipo e da sua formação, com ênfase especial à estratificação de materiais de diferentes classificações, num mesmo local.

3.5 ATENUAÇÃO NATURAL

3.5.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

O processo de interação solo-chorume e as reações físico-químicas envolvidas durante a percolação, resultam na atenuação da carga de contaminantes do chorume.

Esse processo de atenuação resulta na redução da concentração de contaminantes durante o respectivo transporte através do solo. Diversos fatores associados ao solo promovem a capacidade natural de atenuação, porém esta capacidade de assimilar resíduos é limitada. Os processos que influenciam a atenuação podem ser desde uma simples diluição através da água não contaminada que se infiltra no solo, até interações físico-químicas complexas, que fixam ou retardam o movimento dos contaminantes através do meio constituído pelo solo.

Historicamente, o uso da capacidade natural de atenuação do solo, tem sido bastante comum, mesmo quando não se tinha exatamente esse conceito em mente. Apesar disso, atualmente, considera-se que o uso da capacidade de atenuação do solo é de alto risco e deve ser considerado somente em alguns casos particulares, tais como em sistemas de pequeno porte. O uso da capacidade da atenuação do solo é considerado de alto risco, com base em duas questões: estimativa da carga de contaminantes e a quantificação dos mecanismos de atenuação dessa carga presente no chorume. O conceito atual de sistemas de disposição considera a maximização da capacidade de contenção e remoção do chorume.

Um local ideal para disposição, é aquele capaz de conter indefinidamente os resíduos e o chorume resultante, com base nas características geológicas, hidrogeológicas e através de atividades de engenharia.

Um sistema de atenuação natural possibilita a migração lenta dos líquidos, permitindo o envolvimento de processos de atenuação e dispersão, reduzindo a concentração de poluentes a níveis aceitáveis.

Embora os conceitos atuais de sistemas de disposição não utilizem essa capacidade como uma filosofia de projeto, a capacidade natural de atenuação é ainda considerada como um importante mecanismo de segurança para os sistemas de coleta de chorume.

Deve-se considerar, ainda, que os sistemas predominantes no Brasil, apesar da legislação e dos novos conceitos, são os conhecidos “lixões”, em que se emprega ao extremo, a capacidade natural do solo em atenuar a carga de contaminantes. Na maioria dos casos, certamente ocorrem sobrecargas que resultam na propagação de seus efeitos a longas distâncias, caso não se sejam implantados mecanismos de contenção, resultando na necessidade de remediação de área.

3.5.2 PROCESSOS DE ATENUAÇÃO

Como descrito por McBean *et al* (1995) e Qasin *et al* (1994), atenuação é um processo físico, químico e/ou biológico, que causa um decaimento transitório ou permanente na concentração de contaminantes dos resíduos aterrados durante um determinado tempo ou distância percorrida.

Os solos naturais apresentam um sistema complexo e dinâmico em que interagem continuamente os processos físicos, químicos e biológicos. O solo é um sistema heterogêneo e polidisperso de componentes sólidos, líquidos e gasosos, em diversas proporções, e são também bastante porosos e constituem corpos quimicamente solventes pela presença de água em seus interstícios. Os solos consistem de compostos quimicamente inertes, de substâncias de alta ou baixa solubilidade, de uma grande variedade de compostos orgânicos e de organismos vivos e ainda apresentam um meio favorável no qual ocorrem atividades biológicas complexas de forma simultânea. A força de interação e a predominância de uma reação sobre outra é controlada pelos constituintes específicos do solo. Os constituintes e sua importância variam com a matriz (rocha), o tempo, o clima, a topografia, e a vegetação. As principais propriedades do solo, que influenciam na mobilidade dos componentes dos resíduos são: (a) textura e distribuição do tamanho de partículas, (b) quantidade de hidróxidos (Fe, Mn, e Al), (c) tipo e quantidade de matéria orgânica, (d) capacidade de troca iônica, e (e) pH do solo.

A atenuação do chorume a partir de “lixões” e aterros de resíduos, ocorre em dois estágios: (1) escoamento através da zona insaturada, e (2) escoamento através do aquífero subterrâneo.

3.5.3 MECANISMOS DE ATENUAÇÃO

Qasin *et al* (1994) descrevem que os mecanismos de atenuação podem ser classificados em físico, químico e biológico. As principais formas de atenuação estão incluídas nesses mecanismos.

- Físico: filtração, difusão e dispersão, diluição e absorção
- Químico: precipitação/dissolução, adsorção/desorção, complexação, troca iônica e reações de redox
- Microbiológico: biodegradação aeróbia e anaeróbia

3.5.3.1 Mecanismos Físicos

Filtração

O chorume contém partículas suspensas de diversos tamanhos, em que a filtração é aplicável, contudo a remoção ocorre principalmente pelo efeito de coar. Neste caso as partículas acumulam-se nos vazios e a permeabilidade do solo decresce, como demonstrado por Rice (1974). Desta forma é possível a redução da migração do chorume devido à redução da permeabilidade. A extensão do processo resultante, como forma de atenuação, é de difícil estimativa. Os diversos mecanismos específicos envolvidos no processo de filtração são descritos por Devigny *et al* (1990).

Difusão e Dispersão

Difusão e dispersão são dois mecanismos em que o chorume é diluído pela água existente no aquífero. A difusão molecular é causada pelo gradiente de concentração do contaminante, que move de uma região de alta concentração para uma de baixa concentração.

A dispersão hidrodinâmica é o resultado de variações de velocidade da água e contaminantes no meio poroso, durante o escoamento. É um processo eficiente para atenuar os picos de concentração de contaminantes. Maiores detalhes são descritos por Mang (1978), citados por McBean *et al* (1995).

Diluição

A diluição reduz a concentração dos constituintes do chorume pela mistura que ocorre com as águas subterrâneas. O grau de diluição é proporcional ao fluxo de água em relação ao de chorume, e depende também da textura do solo, sendo que quanto menor sua granulometria, menor será o fluxo e conseqüentemente o grau de diluição. Segundo Bagchi (1994) parâmetros tais como cloretos, nitratos, sulfatos e dureza, encontrados no chorume de aterros sanitários, são atenuados basicamente pelo efeito da diluição.

Absorção Física

A absorção física é função das forças de Van der Waals, da ação hidrodinâmica e das propriedades eletrocinéticas das partículas do solo, como descreve Mortimer (1968), citado

por McBean *et al* (1995). Supõe-se que os componentes orgânicos do solo constituem o primeiro fator para a quantificação dessa absorção.

3.5.3.2 Mecanismos Químicos (segundo McBean et al, 1995, Qasin et al, 1994, e Bagchi, 1994)

Precipitação/Dissolução

Precipitação e dissolução são reações importantes que controlam os níveis e limitam a quantidade total de contaminantes no chorume, quando este percola através do solo. Os níveis de contaminantes são normalmente governados pela solubilidade da fase sólida. Particularmente, as reações de precipitação/dissolução são importantes na migração de metais. Por outro lado, a atenuação dos efeitos nos metais é bastante influenciada pelo pH do sistema (equilíbrio químico de reações).

Adsorção/Desorção

A adsorção é um processo através do qual as moléculas se aderem a superfícies de partículas individuais (principalmente argilas). A desorção, por outro lado, é processo em que as moléculas deixam uma determinada superfície. Ambos os processos dependem do pH e da natureza do solo e dos contaminantes.

Este mecanismo é considerado freqüentemente como o mais comum na atenuação de contaminantes, reduzindo o total de sólidos dissolvidos no chorume.

Além das argilas minerais, sais de alumínio hidratado, óxidos de ferro e manganês e compostos orgânicos, são responsáveis pela adsorção de contaminantes.

Complexação

A complexação ou quelação é a denominação para a formação de complexos inorgânicos-orgânicos. Embora este mecanismo de atenuação ocorra, a extensão de seus efeitos é desconhecida e de difícil previsão.

Troca Iônica

As argilas têm a propriedade de trocar íons de um tipo por outros. A capacidade total dos solos na troca de cátions é afetada pelo tipo e quantidade de material argiloso, matéria

orgânica e pelo pH. Essa capacidade, denominada CEC (cation exchange capacity) é elevada para solos argilosos, reduzindo-se bastante para solos arenosos.

Em geral, minerais de silicato no solo, apresentam uma carga negativa permanente, conseqüentemente, a propriedade troca de cátions, surge da necessidade do balanço da carga negativa da argila, na tentativa de atingir a neutralidade.

A capacidade de troca iônica dos solos depende basicamente de: (a) tamanho das partículas, (b) quantidade de componentes orgânicos, e (c) pH. Solos contendo grãos pequenos apresentam maior superfície específica e maior possibilidade de troca. Os componentes orgânicos incrementam a capacidade de troca e a capacidade de troca de cátions aumenta com a elevação do pH do solo.

Na natureza, os mecanismos de remoção de metais por troca iônica não são significativos, pois outros cátions, tais como cálcio, magnésio, sódio e potássio, apresentam-se em maior concentração no chorume, ocupando o lugar daqueles.

Reações de Redox

São reações de oxidação e redução, que afetam muito a solubilidade dos contaminantes. Como exemplo, ferro e manganês no estado oxidado são muito pouco solúveis. A atenuação de outros metais em um ambiente redutor e na presença de sulfeto em quantidade suficiente é mais favorável devido à queda de solubilidade.

3.5.3.3 Mecanismos Microbiológicos (segundo Qasin et al, 1994)

A decomposição biológica de componentes orgânicos do chorume ocorre na estrutura do subsolo, sendo aeróbia ou anaeróbia, dependendo da presença do oxigênio molecular. Sob condições aeróbias, a matéria orgânica carbonácea, a amônia, o sulfeto, o fósforo, o ferro e o manganês são convertidos em dióxido de carbono, nitrato, sulfato, fosfato e formas oxidadas de ferro e manganês. Sob condições anaeróbias, a matéria orgânica carbonácea é decomposta em ácidos orgânicos, dióxido de carbono, metano e outros compostos orgânicos complexos.

A desnitrificação e a redução de metais são outras reações da atividade anaeróbia.

Em geral, a atividade microbiana provoca a imobilização pela conversão de compostos orgânicos e inorgânicos em massa celular, e através da precipitação de compostos inorgânicos. Neste caso também pode haver mobilização de compostos orgânicos pela

solubilização e fragmentação em partículas menores e a solubilização de metais por reações de redução e a liberação sob condições ácidas (ácido carbônico e outros ácidos orgânicos).

3.5.4 TESTES DE PERCOLAÇÃO EM COLUNAS

Dentre os procedimentos laboratoriais para estudo dos materiais naturais empregados para construção de barreiras de contenção, a técnica da percolação em coluna de solos tem sido a preferida. Esta técnica permite inserir o solo ou extraí-lo, estudar reações químicas, obter informações visuais, etc.

O ensaio de percolação em coluna aproxima-se bastante da situação real e tem sido empregado por muitos pesquisadores no esclarecimento das inter-relações solo-contaminante para subsidiar projetos e obras de engenharia.

Trabalhos diversos têm sido publicados sobre o transporte de contaminantes no meio físico geológico natural e em sistemas de contenção construídos com argila. Sobre os ensaios de adsorção com enfoque para transporte advectivo-dispersivo, uma das referências de maior destaque segundo Overman *et al.* (1980) é o de Heister *et al.* (1953) apud Leite (2000). A mesma autora destaca os trabalhos de Crooks *et al.* (1984), Peterson *et al.* (1985), Taylor *et al.* (1987), Wierenga *et al.* (1989), Hasan *et al.* (1992), Balzamo *et al.* (1993), Sai *et al.* (1993), Baudracco (1994), Jessberger *et al.* (1994), Tan *et al.* (1994), Shackelford *et al.* (1995), Wang *et al.* (1995) e Rowe *et al.* (1996).

No Brasil, Costa (1987) foi o pioneiro a relatar estudos da migração de metais pesado em colunas. Alguns trabalhos efetuados por Zuquette *et al.* (1992, 1995 e 1997) avaliaram a retenção de íons de cloro, potássio, sódio, cobre, cromo bivalente e cádmio em solos da formação Botucatu do município de Ribeirão Preto e em areias argilosas no município de Franca. Também nesses estudos foram avaliados os potenciais empregos do solo da Região de Ribeirão Preto como barreiras de contenção. Outras pesquisas nessa mesma linha no Brasil foram efetuadas por Borges *et al.* (1997), Boscov *et al.* (1997 e 1999), além de Ritter *et al.* (1999) e Ferreira (2000).

Um grande número de diferentes materiais foi testado nesses estudos que envolveram a migração de substâncias. Destacam-se solos finos ou argila pura, solos tropicais, argila tratada, solos naturais misturados, solos quimicamente tratados, solos com adição de cinzas, areia, cascalho, rejeitos de mineração e materiais misturados.

Todos esses trabalhos envolveram a percolação em colunas, sob taxas diversas e quase todos correlacionam as características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas do material, com relação à retenção de íons presentes na solução.

Observa-se que praticamente todos esses estudos envolveram o emprego de íons ou substâncias conservativas em baixas concentrações, não havendo referências ao estudo de percolados de aterros sanitários, em que um dos fatores críticos é a elevada concentração de matéria orgânica biodegradável.

As dimensões das colunas foram as mais variadas, das quais são destacadas algumas na Figura 3-11. Na maioria das vezes esses testes de percolação empregaram os mesmos equipamentos utilizados para testes de permeabilidade ou de compressão triaxial.

As colunas mais indicadas são as de parede rígida, apresentando em geral pequena altura (entre aproximadamente 2 e 12 cm), compatíveis com os permeômetros existentes, como mostrado na Figura 3-11.

Um diferencial significativo é que tais colunas trabalham em geral sob pressão elevada, gerando um gradiente hidráulico grande, por envolverem solos compactados, muitas vezes argilosos. A escolha dos materiais empregados na construção do sistema de percolação tem influência fundamental na qualidade dos dados a serem obtidos, bem como a sua interação com as soluções em estudo. As colunas de percolação confeccionadas com os materiais de PVC e plexiglass parecem ser as mais adequadas por que se tratam de polímeros que apresentam estabilidade química frente às soluções iônicas.

Tabela 3-17: Volume das colunas empregadas dos testes de percolação para diversos autores com diferentes materiais, segundo Leite (2000).

Autor	Volume (cm³)	Materiais do Meio e Soluções
Crooks e Quiley (1984)	1.117	Argila siltosa compactada e salmoura
Taylor <i>et al.</i> (1987)	294	Areia média e salmoura
Costa (1987)	982	Areia lavada e hidróxidos de metais pesados
Wierenga e Genuchten (1989)	613 e 4.208.281	Areia fina
Davis e Singh (1992)	30	Arenoso e solução de zinco
Hasan e Hyot (1992)	1.000.000	Argiloso e Mg, Na e Al
Baudracco (1994)	50.265	arenito argiloso e soluções iônicas
Reddi (1994)	128.252	Solo arenoso e solução coloidal
Tan <i>et al.</i> (1994)	325	Solo natural e argilas e metais pesados
Wan e Wilson (1994)	8.935	Areia quartzosa e colóides
Zuquete <i>et al.</i> (1992)	1.178	Solo arenoso e soluções iônicas

Autor	Volume (cm ³)	Materiais do Meio e Soluções
Jessberger e Onnich (1994)	32	Bentonita, farinha e cascalho de quartzo
Góis (1995)	1.178	Areia argilosa, areia siltosa e areia silto-argilosa e metais pesados
Li e Ghodrati (1995)	9.425 e 18.850	Solo siltoso
Boskov (1997)	392	Argila laterítica e metais pesados

Geralmente, as células de percolação usadas para a simulação do transporte de contaminantes trazem consigo algumas deficiências básicas como: fluxos preferenciais que podem ocorrer nas descontinuidades do próprio solo compactado, ou no contato deste solo com a parede interna do cilindro que o envolve.

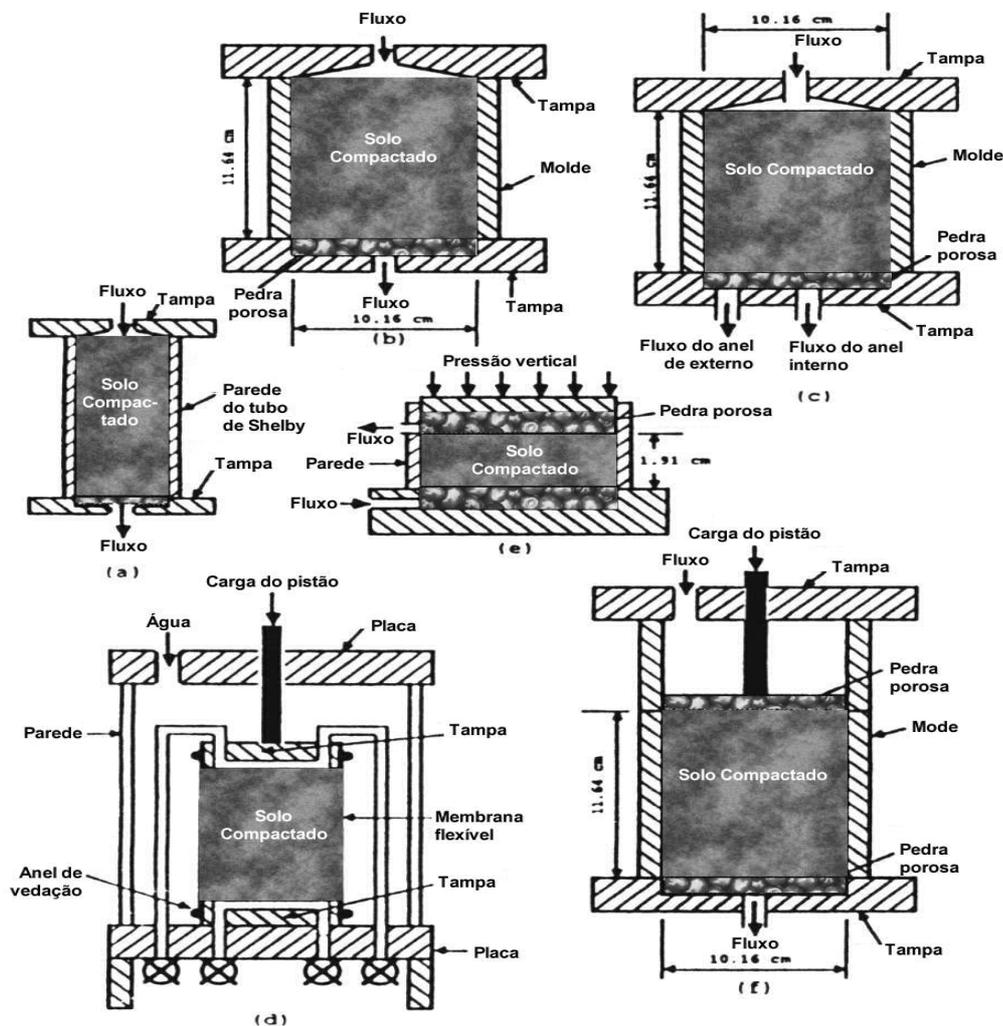


Figura 3-11: Permeômetros: (a) Tubo de Shelby; (b) Molde de compactação; (c) Duplo anel; (d) célula triaxial; e (f) Molde de volume variável.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa experimental realizada visou simular as condições prováveis de campo, para viabilizar sua aplicação prática, sendo que para isto utilizou-se solo natural, em condições de compactações baixas, simulando o solo empolado, obtido com o simples lançamento deste, sem compactação, passando pela densidade natural, e chegando à um baixo grau de compactação da ordem de 80 % do Proctor Normal.

As variáveis básicas do experimento foram físicas e químicas. As variáveis físicas corresponderam a taxa de aplicação hidráulica superficial ($\text{m}^3\text{Chorume}/\text{m}^2.\text{dia}$); densidade do solo das colunas; e taxa de aplicação hidráulica volumétrica ($\text{m}^3/\text{m}^3\text{Solo}.\text{dia}$).

Foram consideradas as seguintes variáveis de eficiência para as diferentes taxas hidráulicas aplicadas: remoção de DQO como parâmetro base; remoção de sólidos totais; e carga de DQO aplicada ($\text{kgDQO}/\text{kgSolo}.\text{dia}$).

Compararam-se os dados das diversas colunas, considerando-se diferentes densidades do solo. Comparou-se também a variação da redução da DQO em função de diferentes taxas de aplicação hidráulica, considerando-se a intermitência operacional da alimentação. Na primeira bateria de ensaios aplicou-se uma única carga de chorume de 1 litro em cada semana durante 4 semanas. Isto representa uma taxa concentrada de $0,135 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ ou uma taxa média diária de $0,0193 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ ao longo de uma semana. Na segunda e na terceira bateria de ensaios aplicaram-se cargas diárias de 0,25 litros durante 5 dias por semana, o que representa uma taxa concentrada de $0,0339 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ ou uma média diária semanal de $0,0241 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, sendo que ao final da segunda bateria de ensaios aplicou-se a mesma carga diária de água, para tentar simular o comportamento do solo utilizado, como cobertura do aterro, onde estaria sujeito a lixiviação devido as chuvas. Na terceira bateria de ensaios, trabalhou-se com colunas em duplicata, com mesma densidade, sendo uma alimentada com água e outra

com chorume, e formando-se amostras compostas semanais para avaliação de remoção de metais, quanto aos demais procedimentos seguiu-se os ensaios anteriores.

Ressalta-se que neste estudo trabalhou-se com duas condições de coleta de efluente das colunas de percolação, ou seja, a coleta na parte inferior da coluna, e a coleta em uma cota superior a do solo, através de uma mangueira interligada a parte inferior da coluna, portanto mantendo o solo “afogado”, ou como denominou-se neste estudo, “em condições saturadas”, porém deve ser observado que devido a não haver pressão (carga hidráulica) na alimentação, na realidade não se tem todos os vazios do solo preenchidos com líquidos, portanto não existe realmente uma saturação do solo.

4.1 CONCEPÇÃO DAS COLUNAS DE PERCOLAÇÃO

Para a montagem das colunas de percolação, como mostrado na Figura 4-1, foram considerados os seguintes procedimentos:

- a especificação do equipamento foi feita na tentativa de se evitar os fluxos preferenciais e reduzir o potencial de adsorção que ocorre nas superfícies do material com a qual se confecciona a coluna;
- a escolha dos materiais empregados na construção do equipamento seguiu o critério de baixo custo e da facilidade de aquisição, associados à necessidade de serem resistentes além de serem inertes ao solo, à água e à solução percoladora. Portanto foram usados tubos de PVC com diâmetro de 10 cm para a construção das colunas, e para as partes flexíveis foram usadas mangueiras de silicone;
- utilizou-se flanges, placas perfuradas e conectores para tomada de amostras, confeccionados em *nylon*, por também ser um material inerte ao solo e a solução percoladora;
- a construção foi feita de maneira simplificada usando-se o mínimo de serviço técnico especializado (mão de obra comum de torneiro mecânico);
- foram montadas colunas, preenchidas com solo, com densidades de 1,15; 1,30; 1,50 e 1,67, com tomadas de amostras na parte inferior da coluna, portanto em condições não saturadas, e colunas com densidades de 1,15 e 1,30, com tomadas de amostras em cota superior a cota do solo empregado, portanto em condição considerada saturada;

- para a obtenção da densidade desejada, foi considerado a umidade ótima de 10,7 % determinada por Calças (2001), uma vez que o solo utilizado foi retirado no mesmo local, sendo assim, ajustou-se à umidade ótima e obtendo-se a massa necessária para o preenchimento da coluna, que tem seu volume conhecido, para assim se obter a densidade desejada.
- sobre a placa perfurada, utilizou-se uma camada de 10 mm de pedrisco, coberto com uma manta geotêxtil, para facilitar a drenagem e impedir a saída de material terroso;

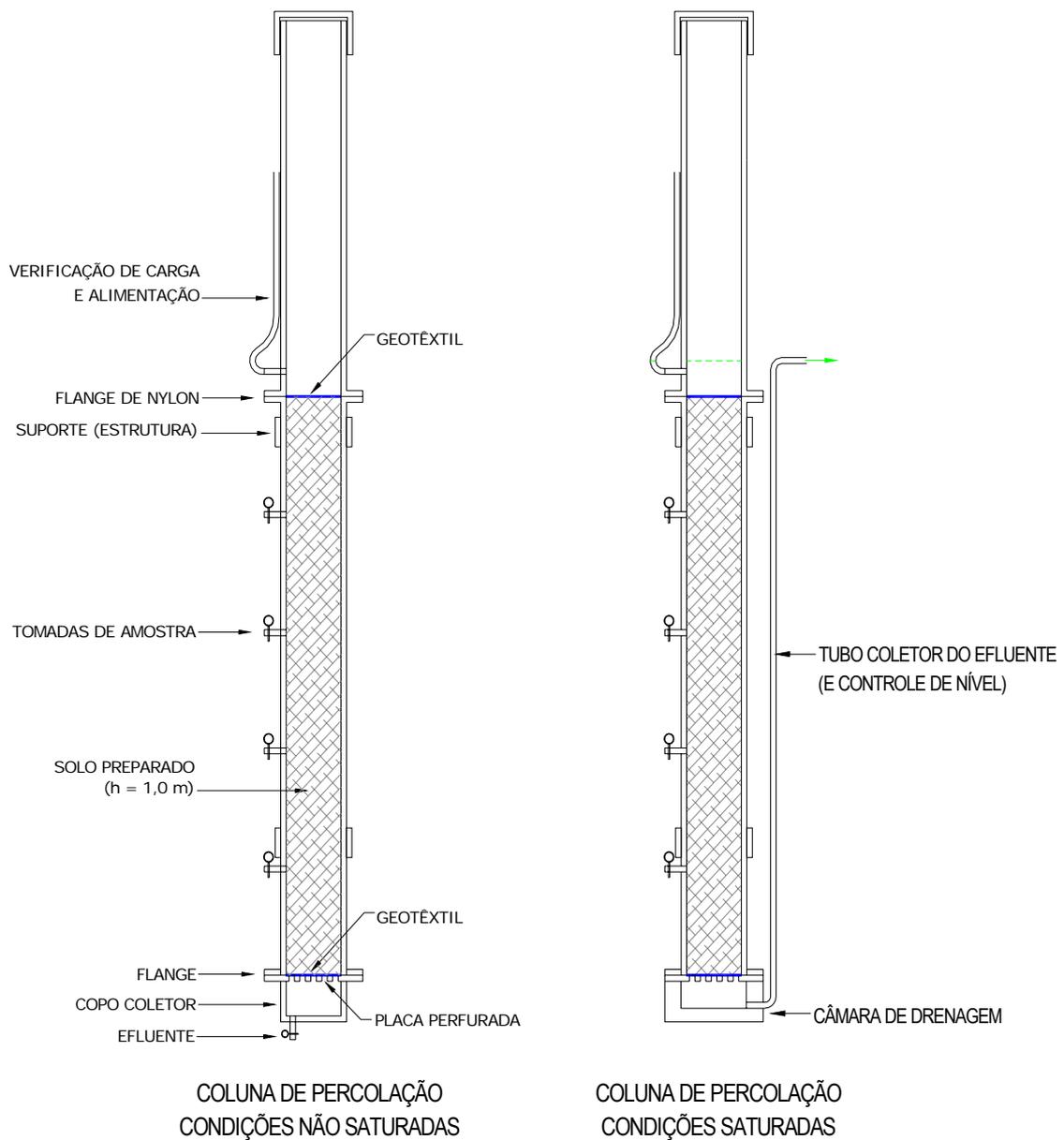


Figura 4-1: Esquema das Colunas de Percolação

- sobre o solo compactado até a densidade desejada, empregou-se mais uma manta geotêxtil para que no momento da alimentação das colunas não houvesse a movimentação do material;
- as amostras foram coletadas em recipientes plásticos, mantidos conectados as mangueiras de saída de efluente das colunas, que permaneciam em refrigerado em recipiente térmico.

4.2 SOLO ESTUDADO

4.2.1 DESCRIÇÃO DA GEOLOGIA DA REGIÃO

A área ocupada pelo município de Bauru pertence à Bacia Sedimentar do Paraná, e está inserida no Planalto Arenítico-Basáltico do Estado de São Paulo (Planalto Ocidental), onde o quadro geológico regional é dominado por rochas do Grupo Bauru (Cretáceo Superior), recobrendo as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral que afloram em direção ao vale do Rio Tietê.

Soares (1979) *apud* Agnelli (1997), dividem o Grupo Bauru, da base para o topo, nas Formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília, sendo que na região da cidade de Bauru ocorrem apenas as Formações Adamantina e Marília.

A Formação Adamantina é constituída por arenitos de granulação média a fina, siltitos arenosos micáceos, argilitos e arenitos conglomeráticos e, raramente, arenitos com nódulos carbonáticos. A fração arenosa é rosada e avermelhada, com boa seleção e arredondamento regular. Sua espessura é muito variável, em função das irregularidades topográficas do abstrato, entretanto sua espessura máxima na área é inferior a 200 m.

A Formação Marília é constituída por arenitos, conglomerados e lamitos, intercalados entre si. Os conglomerados apresentam seixos de composição variada, geralmente de quartzo, calcedônia, quartzito e arenito, e algumas vezes, de calcáreo e argilito. A espessura máxima dessa Formação, encontrada na área de Bauru, é da ordem de 80 a 90 m, embora regionalmente possa atingir 200 m.

4.2.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO TÍPICO DESSA REGIÃO

Ferreira (1991) apud Agnelli (1997), apresenta amplo estudo de caracterização do solo da cidade de Bauru, utilizando amostras deformadas e indeformadas extraídas de metro em metro, em poços escavados em três diferentes pontos da cidade, com profundidade de até 16 metros.

Nesses poços exploratórios encontrou-se um solo de textura bastante homogênea, e que foi classificado, segundo as diferentes metodologias previstas na literatura, em:

- a) quanto a movimentação dos sedimentos: *residual de arenito*;
- b) quanto a pedologia: *latossolo vermelho escuro a amarelo*;
- c) quanto a granulometria (classificação textural): predominância de *areia fina argilosa*, ocorrendo em algumas cotas uma *areia siltosa* e, raramente, *areia fina silto-argilosa*;
- d) quanto a atividade coloidal: *argila não ativa*

A capacidade de troca catiônica (CTC) de um solo, é determinado através de uma análise química, em que se verificam as quantidades de cátions trocáveis (Ca, Mg, K, Na, H e Al).

De acordo com Cavaguti (1981) apud Agnelli (1997), a baixa Capacidade de Troca Catiônica (CTC) deste solo, com valores que variaram de 1,64 a 3,54 mEq/100ml de solo, está condizente com o tipo do solo local, que é um latossolo. Esta faixa de valores da CTC, também indica que a caulinita pode ser o argilomineral predominante desse solo.

Segundo Agnelli (1997), que também caracterizou esse solo, o argilomineral predominante na fração fina é a caulinita, com base na baixa capacidade de troca catiônica (CTC), confirmada por microscopia eletrônica de varredura e por difração de raios-x, sendo que, a caulinita é um argilomineral característico dos solos laterizados, geralmente formado em meio ácido, onde o sódio, o potássio, o cálcio e o magnésio são bastante lixiviados, introduzindo-se íons hidrogênio durante a formação de argila.

4.2.3 LOCAL DE AMOSTRAGEM DE SOLO

O solo empregado nas colunas de percolação foram coletados nas proximidades do campo experimental do Departamento de Engenharia Civil, localizado em frente ao IPMet –

Instituto de Pesquisas Meteorológicas do Câmpus de Bauru / Unesp , conforme indicado na Figura 4-2.

As amostras foram coletadas com auxílio de uma escavadeira, e acondicionadas em sacos plásticos, com capacidade de cinquenta litros, os quais foram devidamente fechados, de modo a evitar a secagem e/ou contaminação do solo por agentes externos.

Os sacos contendo o solo, foram armazenados à temperatura ambiente, em local adequado, até a utilização dos mesmos no preenchimento das colunas de percolação, sendo que previamente fez-se as análises necessárias.

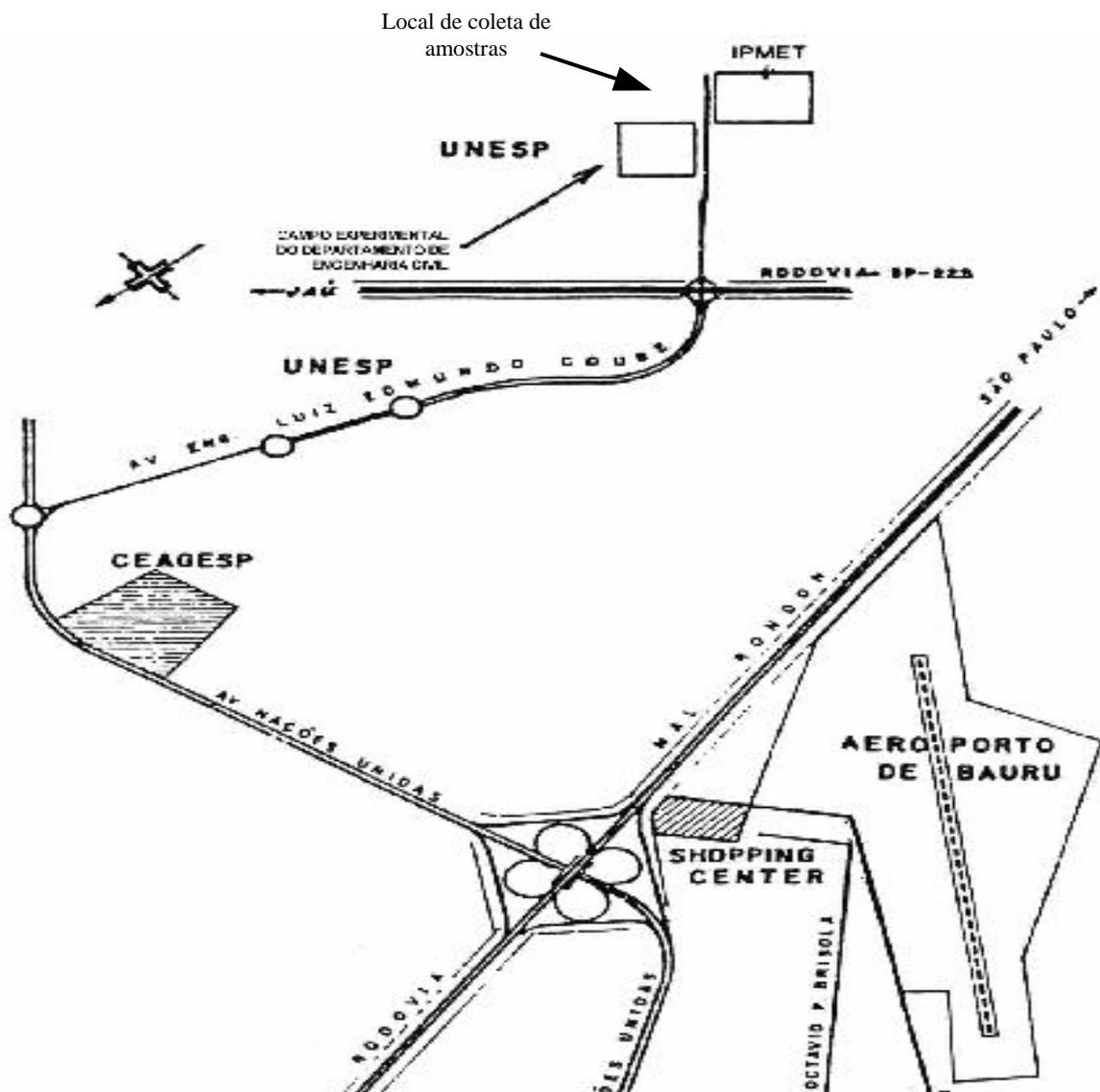


Figura 4-2: Localização da área de coleta do solo para preenchimento das colunas (Calças, 2001).

4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO, COMPACTAÇÃO E PERMEABILIDADE NO SOLO ESTUDADO

Ensaio de permeabilidade a carga variável foram realizados em amostras indeformadas retiradas de poços exploratórios executado no campo experimental da Unesp – Campus de Bauru, por Yano e Lobato (1996) apud Calças (2001). O coeficiente de permeabilidade e os índices físicos dessas amostras, coletadas de metro em metro até uma profundidade de 10 metros, encontra-se na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Índices físicos e coeficiente de permeabilidade do solo na condição natural.

Profundidade (m)	Umidade (%)	Massa específica natural (g/cm³)	Massa específica seca (g/cm³)	Coefficiente de Permeabilidade (cm/s)
1	9,4	1,564	1,43	$1,3 \times 10^{-3}$
2	10,6	1,589	1,437	$1,2 \times 10^{-3}$
3	10,1	1,611	1,463	$5,0 \times 10^{-4}$
4	9,7	1,664	1,517	$4,2 \times 10^{-4}$
5	10,5	1,709	1,546	$4,2 \times 10^{-4}$
6	10,6	1,733	1,567	$3,1 \times 10^{-4}$
7	10,8	1,721	1,553	$2,2 \times 10^{-4}$
8	10,3	1,832	1,661	$1,7 \times 10^{-4}$
9	10,5	1,841	1,666	$1,6 \times 10^{-4}$
10	10,1	1,873	1,715	$2,2 \times 10^{-4}$

Amostra representativa da profundidade de 1 metro foi submetida a ensaios para determinação do limite de consistência e da composição granulométrica, Mondelli e Rodrigues (2001).

Os limites de consistência determinados segundo as normas NBR 6459/84 e NBR 7180/84 da ABNT, foram os seguintes;

- Limite de liquidez: 19,3 %
- Limite de Plasticidade: 14,5 %
- Índice de Plasticidade: 4,8 %

A partir da curva granulométrica, Figura 4-3, foi obtida a seguinte composição do solo, segundo a escala da ABNT/ NBR-7181/84;

- Areia grossa: 0%
- Areia média: 7%
- Areia fina: 67%
- Silte: 8%
- Argila 18%

Portanto, a amostra de solo foi classificada textualmente como areia fina pouco argilosa vermelha.

A massa específica dos sólidos deste solo é de aproximadamente 2,65 à 2,70 g/cm³.

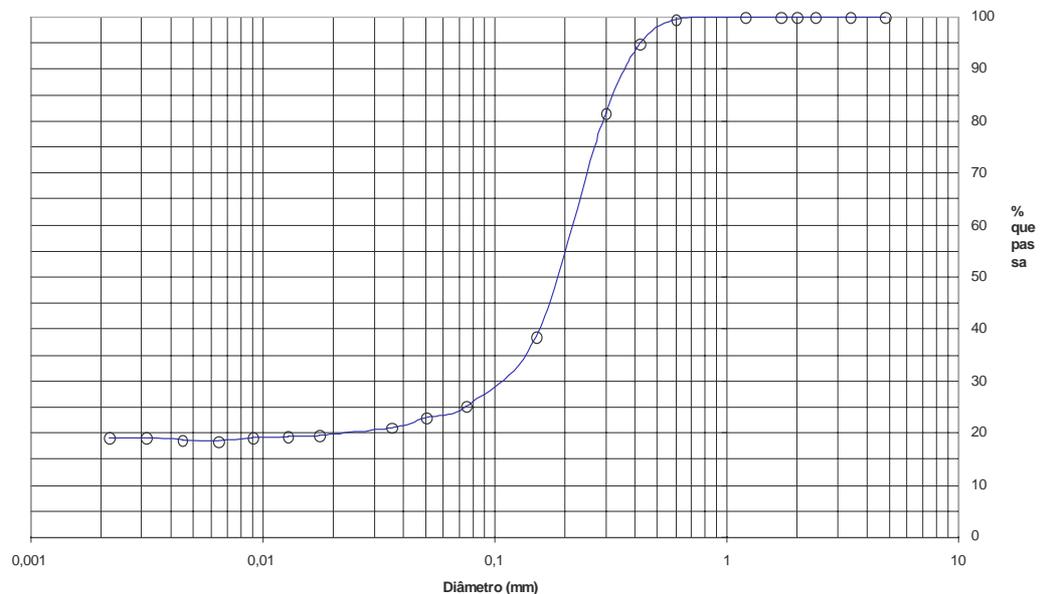


Figura 4-3: Curva Granulométrica obtida para amostra do solo empregado nas colunas (Mondelli e Rodrigues, 2001).

O solo coletado foi submetido a ensaios de compactação e posteriormente foram preparados 5 corpos de prova em permeâmetros, empregando-se energias de compactação equivalentes a 100, 95, 90, 85 e 80% do Proctor Normal.

Foram efetuadas três determinações durante o dia de ensaio. Para cada corpo de prova foi determinada a densidade e, em conjunto com as leituras de permeabilidade, foi estabelecida uma correlação que permitisse estimar a permeabilidade da coluna preparada com a densidade natural do solo, como indicado na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Resultados do ensaios de compactação e permeabilidade com ajuste exponencial de curva.

Ensaio		Coeficientes de Permeabilidade (K) para diferentes leituras (cm/s)			Ajustes	
Massa espec. seca (g/cm ³)	% Proctor Normal	1	2	3	K _{ajustado} (cm/s)	% Proctor Normal
1,90	100	1,8x10 ⁻⁰⁶	1,3x10 ⁻⁰⁶	7,8x10 ⁻⁰⁷	2,2x10 ⁻⁰⁶	98,3
1,89	95	2,0x10 ⁻⁰⁶	3,1x10 ⁻⁰⁶	3,2x10 ⁻⁰⁶	2,6x10 ⁻⁰⁶	97,6
1,77	90	3,8x10 ⁻⁰⁵	3,0x10 ⁻⁰⁵	3,2x10 ⁻⁰⁵	2,0x10 ⁻⁰⁵	88,4
1,72	85	5,3x10 ⁻⁰⁵	4,9x10 ⁻⁰⁵	5,0x10 ⁻⁰⁵	4,7x10 ⁻⁰⁵	84,9
1,66	80	1,0x10 ⁻⁰⁴	9,0x10 ⁻⁰⁵	10,0x10 ⁻⁰⁵	1,3x10 ⁻⁰⁴	80,8
1,50	75	Extrapolado			2,1x10 ⁻⁰³	70,7
1,46	70	Extrapolado			4,1x10 ⁻⁰³	68,4

A partir desses ensaios é possível obter uma correlação que permite associar a compactação com a densidade desejada para a coluna que irá simular o solo natural. Para tanto, basta comparar os valores da Tabela 4-1 e Tabela 4-2, em relação à densidade e permeabilidade verificadas *in situ* para os valores ajustados da densidade de 1,50 g/cm³.

Embora não sejam propriamente os respectivos valores, são representativos em sua ordem de grandeza.

Desta análise, verifica-se que a compactação que resultaria na permeabilidade aproximada do solo natural, seria equivalente a cerca de 70% do Proctor Normal.

O teor de umidade ótima para o solo ensaiado é de 10,7%, valor determinado a partir do ensaio de Proctor Normal. Para este valor de umidade ótima, obtemos graficamente a massa específica aparente do solo seco (ρ_d) no valor de 1,926 g/cm³. A massa específica natural do solo (ρ_d Solo Nat) no valor de 1,564 g/cm³, foi retirado da Equação 4-1.

$$GC = \frac{\rho_d \text{ Solo Nat}}{\rho_d \text{ Max Proctor Norm}} = 73\% \quad \text{Equação 4-1}$$

Esses ajustes, que correlacionam a densidade seca com a permeabilidade e as energias de compactação, podem ser observadas respectivamente na Figura 4-4 e Figura 4-5.

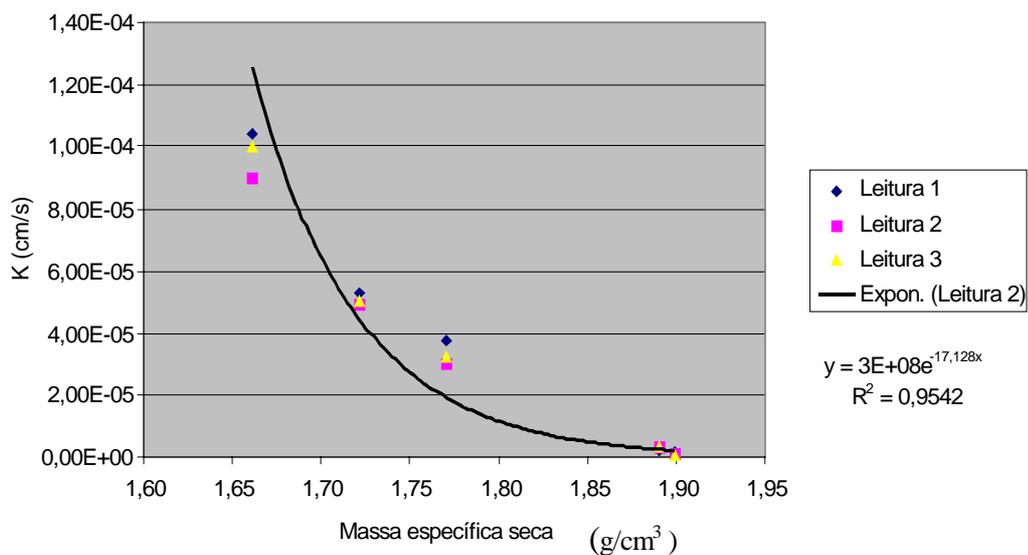


Figura 4-4: Valores do coeficiente de permeabilidade em função da massa específica seca dos corpos de prova, com a curva ajustada exponencialmente.

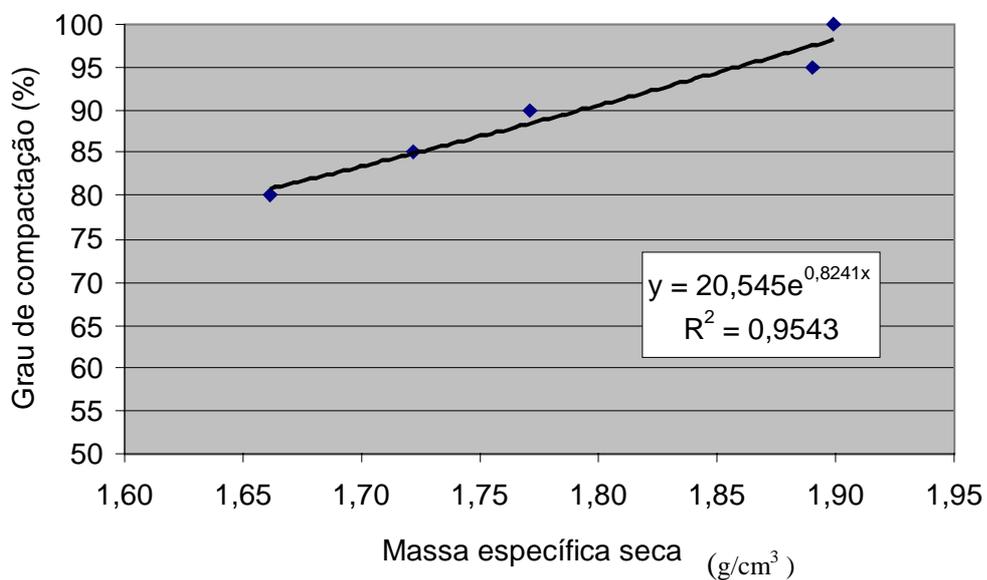


Figura 4-5: Valores da massa específica seca em função do percentual de compactação em relação ao Proctor Normal, com curva de correlação exponencial.

4.4 MONTAGEM DAS COLUNAS DE PERCOLAÇÃO

Foram coletadas amostras do solo local indicado anteriormente, sendo este considerado com as mesmas características do solo encontrado no local do aterro sanitário de Bauru.

Conhecendo-se a umidade ótima do solo amostrado (10,7%), foi determinada a umidade de todas as amostras coletadas e as mesmas foram ajustadas para esta umidade ótima.

Segundo demonstrado por Calças (2001), em seus ensaios preliminares, o solo local, a ser empregado nas colunas, após sua compactação, pode atingir coeficientes de permeabilidade inferiores a 10^{-5} cm/s, chegando próximo a 10^{-6} cm/s. Nestas condições e considerando a altura de coluna de 1,0 m justifica-se trabalhar com densidades mais baixas, uma vez que devido também a colmatção, pode-se ter o escoamento de chorume através das colunas prejudicado.

Na construção das colunas para a execução do experimento, foram utilizadas flanges para conexão entre os segmentos de tubo e para o fundo com a placa perfurada e recipiente coletor mantido refrigerado para cada uma das colunas, conforme pode-se observar na Figura 4-6. E ainda, foram implantados pontos de coleta intermediários, através de bicos coletores com rosca, também confeccionados em “nylon”, porém durante as campanhas de ensaios, verificou-se a impossibilidade de coleta nestes pontos, que foram desconsiderados.



Figura 4-6: Flanges em “nylon” para conexão entre os segmentos de tubo e para o fundo com placa perfurada e recipiente coletor, para as colunas não saturadas, e base selada, para as colunas em condições saturadas.

Os modelos construídos nas três campanhas de ensaios realizadas, perfizeram 6 unidades de acordo com a Figura 4-7.

O procedimento requerido nos ensaios de coluna, em princípio, apresenta simplicidade, mas é de difícil execução quando se trabalha com solos pouco permeáveis.

A compactação foi controlada pela pesagem de quantidades predeterminadas de solo, que após correção da umidade (massa e umidade conhecidas), formaram camadas de 20 cm de espessura (volume conhecido), compactadas através de uma haste metálica dotada de uma chapa circular na extremidade, com diâmetro ligeiramente inferior ao interno do tubo.

Primeiramente as colunas, de PVC, com diâmetro interno de 9,7 cm, contendo uma camada de 1 m de solo arenoso fino, foram distribuídas em duas em condições, saturadas, com densidade de 1,15 e 1,30, e não saturadas com densidade de 1,15; 1,30; 1,50 e 1,67, sendo posteriormente repetida esta distribuição em uma segunda campanha, onde somente variou-se a taxa de aplicação de chorume, e finalmente em uma terceira campanha de ensaio, executou-se a montagem de 6 colunas não saturadas distribuídas em duplicata, variando a densidade de 1,15; 1,30 e 1,50.

Tais compactações representam condições que variam de uma situação de empolamento, ou apenas o lançamento do solo ($d=1,15$), passando pela densidade natural ($d=1,5$), até o limite de 80% do Proctor Normal ($d=1,67$).



Figura 4-7: Colunas preenchidas com solo em diferentes graus de compactação e condições de saturação.

4.5 AMOSTRAGEM, PRESERVAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CHORUME

O município de Bauru conta com um sistema de disposição de lixo doméstico nos moldes de um aterro sanitário, com uma boa operação em termos de descarga, compactação e cobertura do lixo. Os maiores problemas são encontrados na execução da base, que embora se procure atingir uma baixa permeabilidade, não é feito um controle mais rígido de execução, sendo que o chorume utilizado neste estudo foi coletado neste local.

Qualidade do Chorume Bruto

Primeiramente pretende-se efetuar uma breve abordagem com relação à qualidade do chorume aplicado nas colunas de percolação, uma vez que os resultados não podem ser generalizados quanto ao termo empregado para este tipo de efluente.

As análises efetuadas ao longo das campanhas de ensaios, foram primeiramente compatíveis para um chorume de 10 anos, sendo que para a última campanha utilizou-se um chorume coletado em uma caixa de passagem intermediária, correspondente a drenagem existente junto a frente de disposição em operação, portanto obtendo-se um chorume com característico de aterros novos. A idade, por assim dizer, do chorume ou na realidade do aterro sanitário, denota sua característica de estabilidade, sendo que para o chorume utilizado nas primeiras campanhas pode-se afirmar que esta estabilidade esteve diretamente relacionada com a presença bastante significativa de substâncias orgânicas humificadas e pela elevada alcalinidade. Tal conclusão reforça os resultados obtidos por Calças (2001) em ensaios para o tratamento físico-químico desse chorume, que mostraram a predominância de substâncias dissolvidas, caracterizadas pelo elevado valor da cor, responsável pela baixíssima eficiência deste processo.

Por outro lado, apesar da cor elevada, a aplicação do chorume no solo demonstrou sua capacidade em remover tais substâncias dissolvidas, provavelmente, pela adsorção pela argila presente, até que a mesma fosse saturada.

Demonstrou-se, portanto, uma importante capacidade do solo estudado em reter substâncias húmicas, ainda que seja limitada, porém inicialmente de forma bastante eficiente.

Locais de amostragem de chorume

O chorume do aterro sanitário de Bauru, na realidade um aterro controlado, foi coletado no poço de recalque e recirculação, conforme Figura 4-8, localizado à jusante da área

de disposição, e em uma caixa de passagem, próxima a frente de disposição, visando obter um chorume com características de aterros novos, sendo estes foram armazenados em bombonas plásticas, com capacidade de 50 litros, as quais, durante as campanhas de ensaios, foram mantidas refrigeradas.

Ressalta-se que as amostragens foram realizadas preliminarmente à execução da segunda e terceira campanha de ensaios, coletando-se volume suficiente à sua devida caracterização e uso até o final de cada campanha, visando assim evitar variações bruscas na qualidade do chorume utilizado, uma vez que para a primeira campanha de ensaios, foi realizada duas coletas, obtendo uma variação considerável na qualidade do chorume, o que influencia diretamente na interpretação dos dados obtidos.



Figura 4-8: Poço de concentração, recalque e recirculação de chorume do aterro de Bauru.

Caracterização do chorume

Um dos fatores que mais preocuparam o encaminhamento dessa pesquisa foi quanto à caracterização do chorume aplicado nas colunas. Anteriormente e durante todo os ensaios foram efetuadas análises do chorume do aterro sanitário de Bauru, proposto para ser usado como afluente, visando avaliar principalmente os valores de DBO_5 , DQO e pH, além de determinar, para cada campanha de ensaios, o valor de referência para cada parâmetro avaliado especificamente.

Para a primeira campanha de ensaios, que ocorreu no período de 01/11/2003 à 28/11/2003, foram realizadas duas coletas de chorume, em 17/10/2003 e 12/11/2003, as quais apresentaram variações significativas nos parâmetros analisados, conforme mostrado na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Caracterização do chorume utilizado na primeira campanha de ensaios.

Data da coleta	17/10/2003	12/11/2003
Horário	09:25	14:55
Chuvas nas últimas 24 hs	Não	Sim
pH	7,97	8,06
Alcalinidade (mg/l)	8.800,00	9.650,00
Cloretos (mg/l)	4.120,00	3.750,00
DBO ₅ (mg/l)	3.180,00	980,00
DQO (mg/l)	6.830,00	4.510,00
Condutividade (µs/cm 20°C)	6.140,00	10.700,00
Sólidos Totais (mg/l)	12.270,00	11.072,00

Tendo em vista as variações apresentadas na qualidade do chorume utilizado durante a primeira campanha de ensaios, optou-se durante as campanhas subsequentes, a realização de apenas uma coleta de chorume em volume suficiente para a execução de toda a campanha de ensaios, e ainda preservando a amostra refrigerada visando o mínimo de alteração na qualidade do afluente, a qual foi acompanhada através da realização de ensaios durante toda a campanha.

Na Tabela 4-4 são apresentados os resultados da caracterização do chorume coletado em 02/12/2003, utilizado na primeira etapa da segunda campanha de ensaios, que ocorreu no período de 05/12/2003 à 13/01/2004, ressaltando-se que estes resultados correspondem as avaliações preliminares, sendo que nos cálculos da carga de DQO aplicada, eficiência de remoção de DQO, carga de DQO removida e eficiência de remoção de Sólidos Totais, foi utilizada a média dos resultados obtidos na realização de ensaios periódicos durante toda a campanha.

Tabela 4-4: Caracterização do chorume utilizado na segunda campanha de ensaios – primeira etapa.

Data da coleta	02/12/2003
Horário	08:00
Chuvas nas últimas 24 hs	não
pH	8,00
Alcalinidade (mg/l)	7.100,00
DBO (mg/l)	3.560,00
DQO (mg/l)	3.080,00
Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm} - 20^\circ\text{C}$)	9.340,00
Cor (PtCo)	5.200,00
Turbidez (FAU)	322,00
Sólidos Totais (mg/l)	9.856,00

Tendo em vista a realização de uma terceira etapa de abastecimento, com chorume, durante a segunda campanha de ensaios, a qual ocorreu no período de 12/03/2004 à 04/04/2004, foi realizada uma nova coleta de chorume, em 11/03/2004, cujos resultados nas análises são apresentados na Tabela 4-5, seguindo-se os mesmos procedimentos da coleta anterior.

Tabela 4-5: Caracterização do chorume utilizado na segunda campanha de ensaios – terceira etapa.

Data da coleta	11/03/2004
Horário	08:00
Chuvas nas últimas 24 hs	Sim
pH	7,98
Alcalinidade (mg/l)	5.232,00
DBO (mg/l)	400,00
DQO (mg/l)	2.100,00
Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm} - 20^\circ\text{C}$)	12.260,00
Cor (PtCo)	3.500,00
Turbidez (FAU)	216,00
Sólidos Totais (mg/l)	7.612,00

E finalmente para a terceira campanha de ensaios, a qual ocorreu no período de 05/05/2004 à 27/05/2004, foi realizada coleta de chorume, em 29/04/2004, cujos resultados nas análises são apresentados na Tabela 4-6, seguindo-se os mesmos procedimentos da coleta anterior, ressaltando-se que conforme descrito anteriormente, este foi coletado em uma caixa de passagem intermediária, próxima a frente de operação, obtendo-se um chorume característico de aterros novos.

Tabela 4-6: Caracterização do chorume utilizado na terceira campanha de ensaios.

Data da coleta	11/03/2004
Horário	09:30
Chuvas nas últimas 24 hs	Não
pH	7,23
Alcalinidade (mg/l)	4.380,00
DQO (mg/l)	22.200,00
Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm} - 20^\circ\text{C}$)	4.840,00
Sólidos Totais (mg/l)	20.088,00

4.6 ALIMENTAÇÃO DAS COLUNAS DE PERCOLAÇÃO

A parte experimental deste estudo dividiu-se em três campanhas de ensaios, as quais encontram-se descritas detalhadamente à seguir:

Primeira campanha de ensaios

Na primeira campanha de ensaios, que ocorreu no período de 01/11/2003 à 28/11/2003, adotou-se duas colunas em condições saturadas preenchidas com solo com densidades de 1,15 e 1,30, e 4 colunas em condições não saturadas com densidades de 1,15; 1,30; 1,50 e 1,67, alimentando-as com um volume de 1 litro de chorume uma vez por semana ao longo de 4 semanas, isto representa uma taxa concentrada de $0,135 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{SoloSeco.dia}$ ou uma taxa média diária de $0,0193 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{SoloSeco.dia}$ ao longo de uma semana.

As coletas foram feitas semanalmente, mantendo-se as amostras do efluente refrigeradas em uma caixa térmica junto as colunas de percolação e posteriormente à coleta,

em geladeira, sendo analisado, após cada coleta, os parâmetros DQO, Sólidos Totais, pH, Condutividade, Cor e Turbidez.

Segunda campanha de ensaios

Para a segunda campanha de ensaios, adotou-se as mesmas condições de compactação da primeira etapa, ou seja, duas colunas preenchidas com solo em condições saturadas com densidades de 1,15 e 1,30, e 4 colunas em condições não saturadas com densidades de 1,15; 1,30; 1,50 e 1,67, alimentando-as com um volume de 0,250 litro de chorume por dia, de segunda à sexta feira, o que representa uma taxa concentrada diária de 0,034 m³chorume/m³SoloSeco, sendo avaliados os parâmetros DQO, sólidos totais, pH, condutividade, cor e turbidez.

Esta segunda campanha dividiu-se em 3 etapas, sendo primeiramente, no período de 05/12/2003 à 13/01/2004 feito o abastecimento com chorume por 18 (dezoito) vezes em (quarenta) dias consecutivos, ressaltando-se que houve uma paralisação na alimentação e nos ensaios, no período de 20/12/2003 à 06/01/2004.

Em uma segunda etapa da campanha, no período de 14/01/2004 à 28/02/2004, efetuou-se o abastecimento com água por 26 (vinte e seis) vezes em 46 (quarenta e seis) dias consecutivos, com o mesmo volume, ou seja 250 ml, sendo ressaltado que também houve uma interrupção no período de 24/01/2004 à 06/02/2004.

E finalmente em uma terceira etapa, no período de 12/03/2004 à 04/04/2004, efetuou-se o abastecimento por 18 (dezoito) vezes em 24 dias, novamente com chorume, salientando-se que devido a colmatação acarretando na diminuição da permeabilidade e prejudicando o andamento normal do ensaio, foram desconsideradas a coluna preenchida com solo com densidade de 1,30 em condições saturadas e com densidade de 1,67 em condições não saturadas.

Após o termino desta campanha de ensaios, as colunas foram desmontadas e o solo removido foi submetido à análise de solubilização, segundo critérios da norma NBR 10.006 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, no período de 10/04/2004 à 17/04/2004.

Ressalta-se que para a execução do ensaio cada coluna foi dividida em três partes (inferior, intermediária e superior), sendo retirada uma amostra de cada parte para a realização do ensaio. Os parâmetros analisados foram pH, Condutividade e DQO.

Terceira campanha de ensaios

Para a terceira campanha de ensaios, que ocorreu no período de 05/05/2004 à 27/05/2004, adotaram-se colunas com densidades 1,15; 1,30 e 1,50, em duplicata, todas em condições não saturadas, alimentando uma com um volume de 0,25 litros de chorume e outra com 0,25 litros de água, por dia ao longo de 20 dias, isto representa uma taxa concentrada diária de $0,034 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{SoloSeco}$, sendo avaliado os parâmetros DQO para todas as amostras coletadas e Sólidos Totais, pH, Condutividade e Alcalinidade, para amostras compostas ao longo da semana, totalizando 3 amostras, porém foram formadas 4 amostras compostas durante esta campanha, sendo que, para o efluente das colunas abastecidas com chorume analisou-se ainda os metais: Zinco, Cádmio e Chumbo para as 4 amostras, e para as colunas abastecidas com água, analisou-se os mesmos metais para 2 amostras.

Ressalta-se ainda que para esta terceira campanha de ensaios, utilizou-se chorume coletado em uma caixa de passagem próxima a frente de operação, obtendo-se assim, um chorume com características de chorume novo, diferente do utilizado nas campanhas anteriores, tentando assim avaliar mais esta variável do sistema.

4.7 ANÁLISES QUÍMICAS

Para a realização das análises químicas coletou-se o efluente das colunas, cujas datas estão descritas no Anexo, efetuando-se as análises diariamente, mantendo as amostras sob refrigeração constante para conservação.

Determinação da DQO

A determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) é utilizada para estimar a quantidade de matéria orgânica em efluentes. A medição de oxigênio equivale aos materiais presentes no efluente que estão sujeitos a oxidação através de um forte oxidante químico, neste caso o dicromato de potássio, e foi efetuado de acordo com a *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (19^a ed.) e baseia-se no sistema de semi-micro digestão de amostra. Utilizam-se frascos de reagentes prontos, que foram aquecidos por 2 horas a 150 graus centígrados no microreator Hach. A leitura dos dados foi feita no espectrofotômetro – *Portable Datalogging Spectrophotometer Hach DR/2010* cujos resultados são mostrados diretamente em mg/l.

Determinação de pH

O pH foi medido no pH-metro Orion (Model 310). Mantendo-se o equipamento em perfeito funcionamento e calibração, pode-se obter uma precisão de $\pm 0,02$ unidades de pH e exatidão de $\pm 0,05$ unidades de pH. Porém em condições normais, o limite de exatidão é de $\pm 0,1$ unidade.

Determinação de Alcalinidade

A alcalinidade é uma medida da capacidade que as águas tem de neutralizar ácidos e para esta determinação, utilizou-se o método da titulação da amostra com solução de ácido sulfúrico 0,02 N até pH pré-determinado em 4,5. Os resultados são expressos como equivalentes em mgCaCO_3/l .

Conforme o “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*”, 19ª edição, é difícil estabelecer precisão do método em virtude da grande variedade de características das amostras, e das alterações que podem ocorrer na amostra quando coletada ou manuseada.

Determinação de Condutividade Elétrica

É a capacidade de uma solução aquosa em conduzir uma corrente elétrica. Esta habilidade depende da presença total de íons em sua concentração, da mobilidade, da valência e da temperatura medida na amostra, segundo a *Standard Methods Committee*.

O resultado da condutividade elétrica, expressos em $\mu\text{S}/\text{cm}$ ou mS/cm , foi lido diretamente no condutivímetro Orion (model 115), mergulhando-se o eletrodo na amostra a ser medida.

Determinação de Turbidez

É a redução da transparência de uma amostra, devido a presença de material em suspensão (como é o caso das partículas coloidais). A leitura dos dados foi feita no espectrofotômetro – *Portable Datalogging Spectrophotometer Hach DR/2010* e os resultados são expressos como FAU - Formazin Attenuation Units. A cor é um dos interferentes negativos deste ensaio.

Determinação de Cor Aparente

É a cor conferida à amostra não só pelas substâncias dissolvidas, mas também pelas substâncias em suspensão, e tem como unidade a cor produzida por 1 mg de platina, na forma de íon cloroplatinado, dissolvida em 1000 ml de água, na presença de cobalto em quantidade adequada para comparação com águas naturais. A leitura dos dados foi feita no espectrofotômetro – *Portable Datalogging Spectrophotometer Hach DR/2010* e os resultados são expressos como PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart.

Tendo em vista que o método não se aplica para amostras de coloração incomum, e ainda a interferência concebida pela turbidez, este parâmetro somente será apresentado para fins de comparação das alterações visualizadas durante o ensaio.

Metais

Para a determinação dos metais Cádmio, Chumbo e Zinco, foram feitas amostras compostas semanais dos efluentes das colunas alimentadas com água e chorume, somente para a última campanha de ensaios, enviando-se conjuntamente a um laboratório terceirizado, onde utilizou-se um espectrofotômetro, também seguindo os procedimentos previstos no “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*”. Executou-se ainda a análise destes metais no chorume e na água de torneira, em uma única amostra.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme descrito no capítulo anterior, foram realizadas três campanhas de ensaios, cujos resultados são expostos e discutidos à seguir.

5.1 PRIMEIRA CAMPANHA DE ENSAIOS

São apresentados à seguir os resultados da primeira campanha de ensaios, onde utilizou-se duas colunas em condições saturadas com densidades de 1,15 e 1,30, e 4 colunas em condições não saturadas com densidades de 1,15; 1,30; 1,50 e 1,67, alimentando-as com um volume de 1 litro de chorume por semana ao longo de 4 semanas.

Na Tabela 5-1 encontra-se especificadas as características das colunas de percolação, referentes a esta campanha de ensaios.

Tabela 5-1: Características das colunas de percolação na primeira campanha de ensaios.

	Volume (cm³)	Volume de vazios (cm³)	Massa específica do solo seco (kg/m³)	Massa de solo seco (kg)
Coluna 1	7390	4205	1.150	8,50
Coluna 2	7390	3791	1.300	9,61
Coluna 3	7390	4205	1.150	8,50
Coluna 4	7390	3791	1.300	9,61
Coluna 5	7390	3237	1.500	11,08
Coluna 6	7390	2771	1.670	12,34

Para a melhor visualização dos resultados os mesmos são apresentados na forma de gráficos, separadamente para as colunas em condições saturadas e não saturadas, sendo primeiramente mostrado os gráficos referentes as colunas com densidades de 1,15 e 1,30 saturadas. No Anexo da presente dissertação são apresentadas as tabelas contendo detalhadamente os valores obtidos para todos os ensaios.

Ressalta-se a dificuldade de avaliação dos resultados apresentados, para as colunas em condições saturadas, face ao baixo volume coletado para estas colunas, comparativamente ao volume aplicado.

Conforme observado, para as colunas com densidades de 1,15 e 1,30 em condições saturadas (Figura 5-1 e Figura 5-2, respectivamente), houve um intervalo de tempo expressivo, entre o primeiro abastecimento e a primeira coleta, devido ao volume necessário de chorume para o preenchimento dos vazios do solo, até que se atingisse saturação do mesmo, obtendo-se assim condições para a coleta de efluente.

Na Figura 5-1 nota-se um intervalo de tempo maior entre o início de abastecimento e o início da coleta, tendo em vista o volume necessário para o total preenchimento dos vazios do solo, tornando assim a coluna saturada.

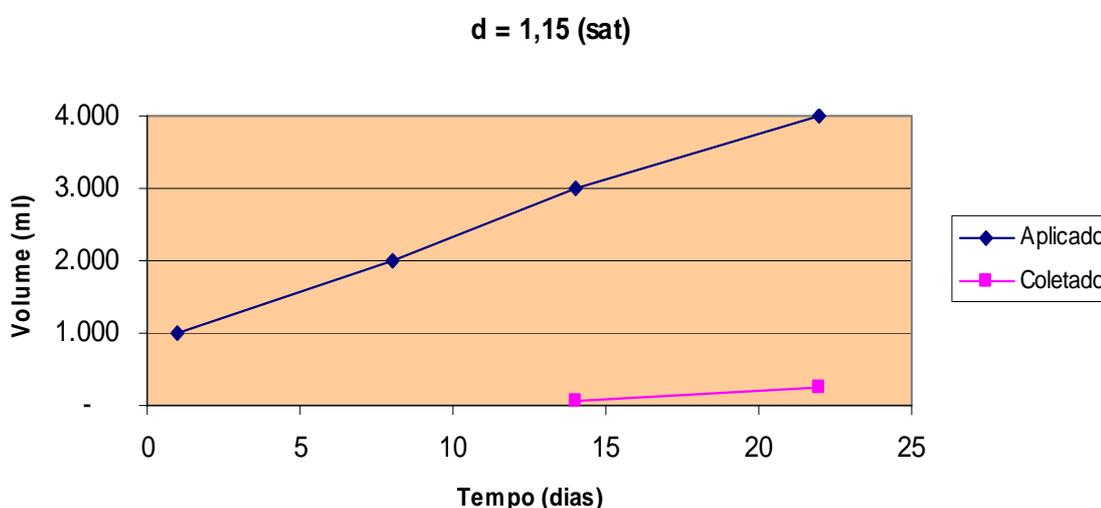


Figura 5-1: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições saturadas.

Comparativamente, pode-se notar na Figura 5-2, que o tempo necessário para o início da coleta de efluente nesta coluna foi menor, devido ao fato do volume de vazios desta ser menor, face a maior densidade.

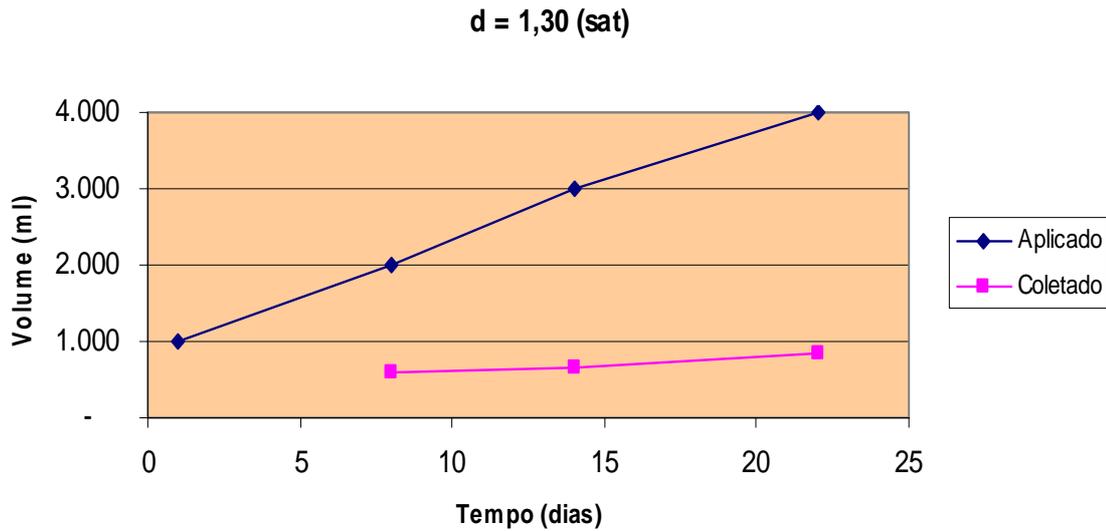


Figura 5-2: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30, em condições saturadas.

Na Figura 5-3 pode-se observar que a eficiência de remoção de DQO para a coluna em condições saturadas, com densidade igual à 1,30, foi maior que para a coluna em condições saturadas, com densidade igual à 1,15, podendo-se associar que, quanto maior a densidade, maior a eficiência de remoção de DQO, devendo-se chegar a um limite de compactação no qual a baixa permeabilidade e velocidade de escoamento inviabiliza a operação.

Nota-se ainda que, como esperado, a eficiência do sistema vai diminuindo em função do tempo, porém, devido ao número reduzido de coletas, nesta campanha de ensaios, não foi possível identificar claramente o limite do sistema, através de um ponto de inflexão acentuado no gráfico.

Ressalta-se que se utilizou nos cálculos da eficiência e da carga removida, a DQO média do chorume, ou seja, 5.670 mg/l, obtida com a realização de ensaios periódicos durante toda a campanha.

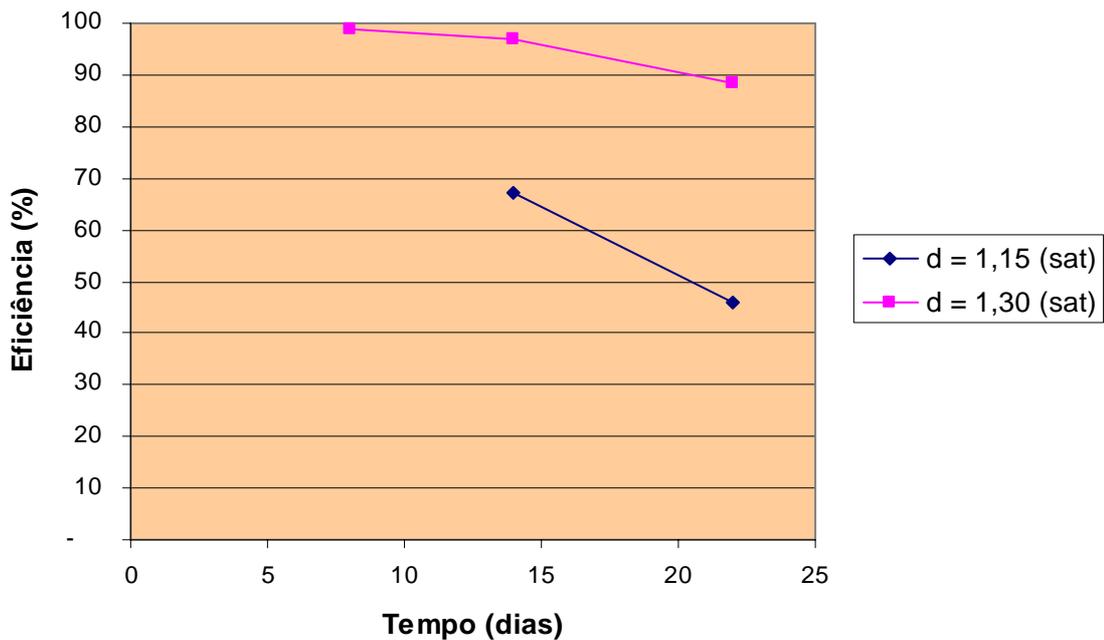


Figura 5-3: Eficiência de remoção de DQO para alimentação com intermitência semanal, com taxa de aplicação hidráulica média de $0,0193 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{dia}$

Ressalta-se na Figura 5-4, que a alta carga inicial de DQO removida, deve-se ao fato de ter havido um elevado volume inicial coletado no efluente, face a uma falha construtiva do sistema, que provocou a sucção do efluente, porém tal evento foi detectado e corrigido prontamente.

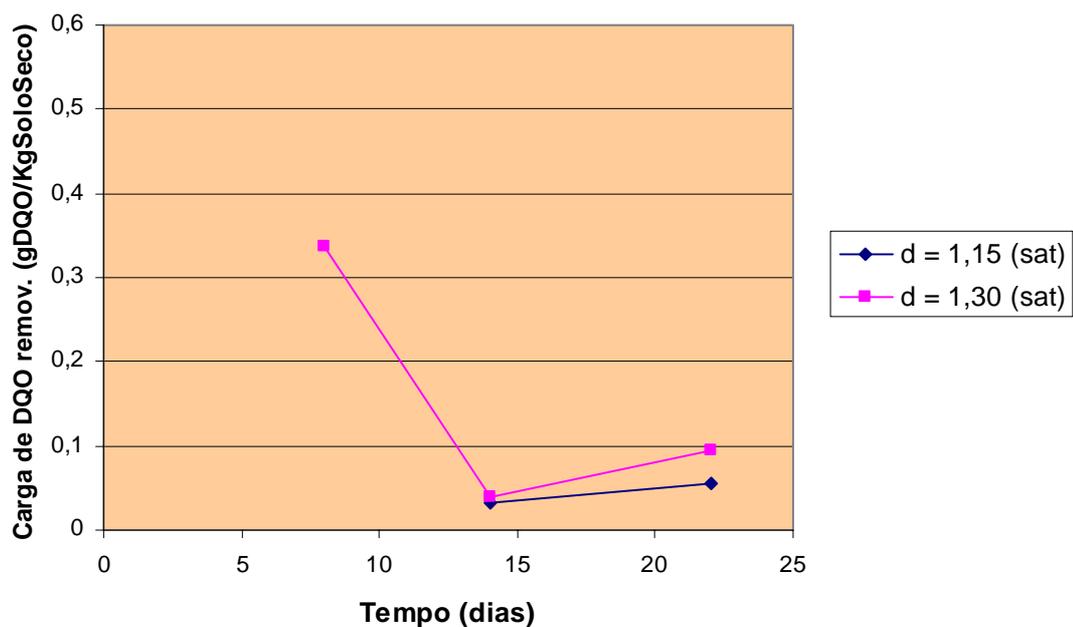


Figura 5-4: Carga de DQO removida para alimentação com intermitência semanal, com taxa de aplicação hidráulica média de $0,0193 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{dia}$.

A avaliação dos resultados apresentados na Figura 5-5, ficou prejudicada, em função do volume coletado no período ter sido muito reduzido, devido ao preenchimento inicial dos vazios, e a vazamentos que ocorreram nesta primeira campanha, que foram prontamente sanados, porém interferindo nos resultados relacionados ao volume coletado.

Ressalta-se, porém, que conforme era esperado a eficiência da coluna com densidade superior foi mais elevada, mas também é esperado que a velocidade de percolação desta seja menor e a colmatação mais rápida, não sendo possível avaliar nesta campanha, devido ao número reduzido de amostras, e pequeno volume, obtidas para estas colunas em condições saturadas

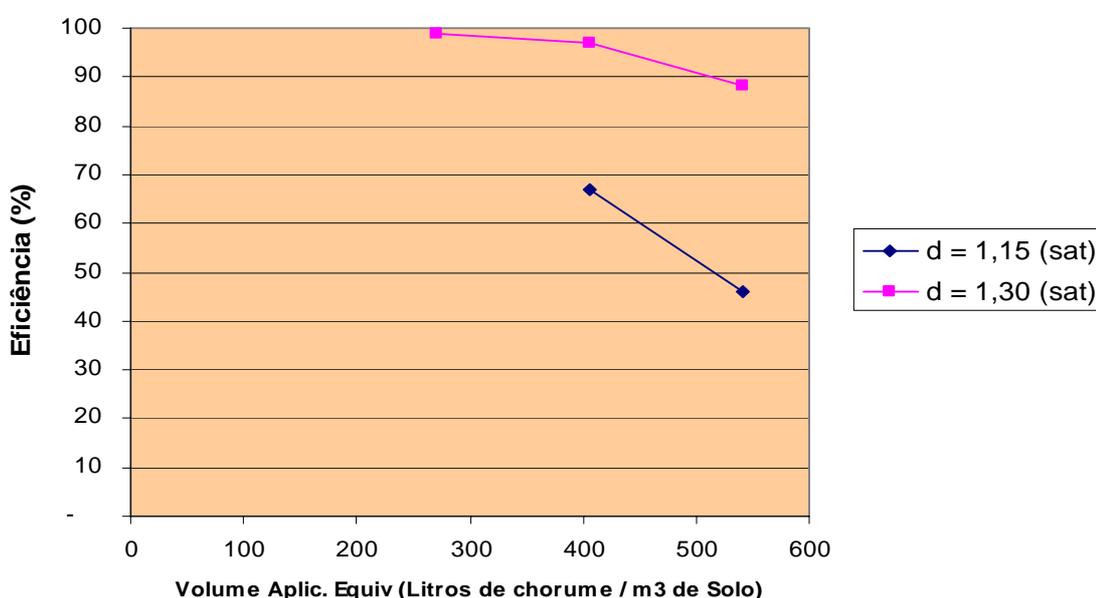


Figura 5-5: Eficiência de remoção de DQO em função do volume aplicado por metro cúbico de solo seco.

Na Figura 5-6 são representados os resultados obtidos para o pH do efluente coletado das colunas em condições saturadas, salientando-se que o pH do chorume (afluente), no período de realização dos ensaios variou de 7,97 à 9,06, sendo novamente ressaltado que os resultados discrepantes podem ter sido ocasionados em função do pequeno volume coletado, e dos interferentes ocasionados pelas falhas construtivas do sistema, nesta montagem inicial.

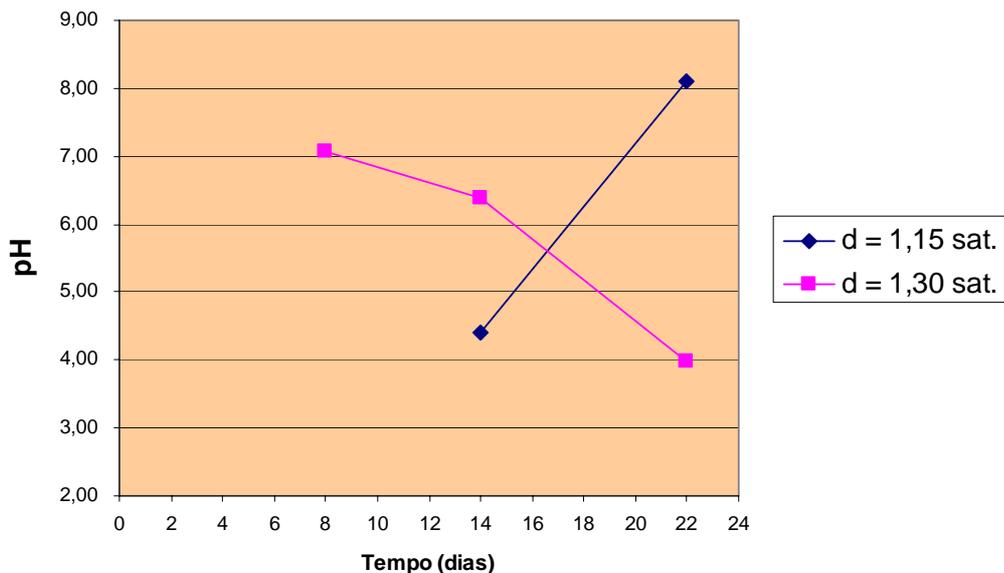


Figura 5-6: Valores do pH para as amostras dos efluentes coletados nas colunas em condições saturadas.

Na Figura 5-7, onde são apresentados os valores da condutividade obtida para o efluente das colunas em condições saturadas, nota-se que estes mostram-se condizentes com o esperado, ou seja, que se obtenha baixos valores iniciais, elevando-se em função do tempo, e ainda um valor maior para o efluente da coluna com menor densidade, a qual tem menor eficiência na remoção de contaminantes, que influem diretamente na elevação da condutividade. A Condutividade do chorume variou de 6.140 à 10.700 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ($T=32^\circ\text{C}$).

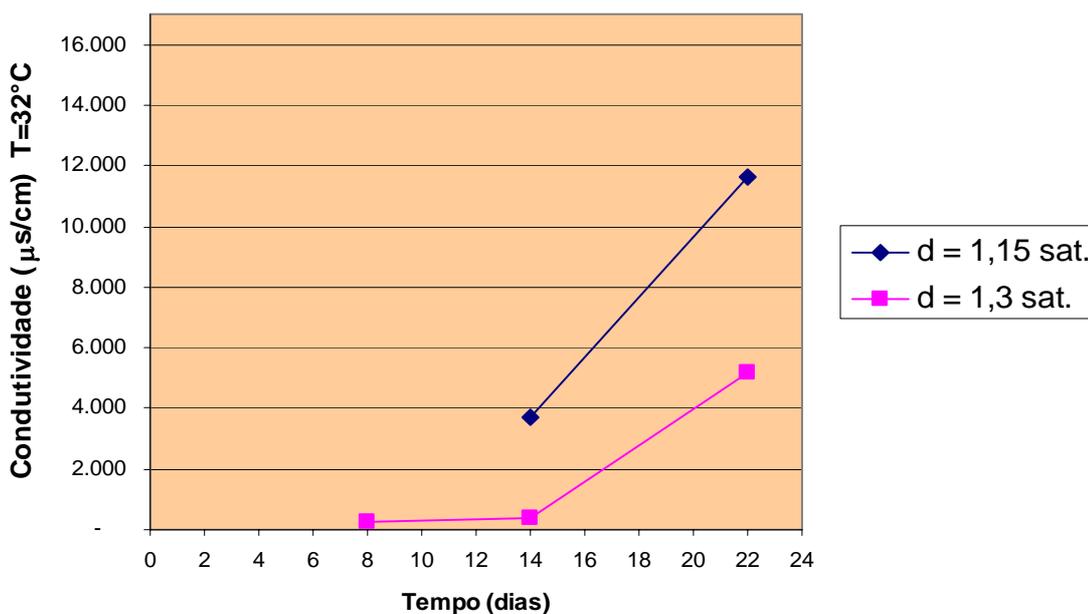


Figura 5-7: Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^\circ\text{C}$, para as amostras do efluente coletado nas colunas em condições saturadas.

Analogamente ao que foi descrito para os valores de condutividade, verifica-se na Figura 5-8, que, também para a Cor, foram obtidos baixos valores iniciais, elevando-se em função do tempo, e ainda um valor maior para o efluente da coluna com menor densidade.

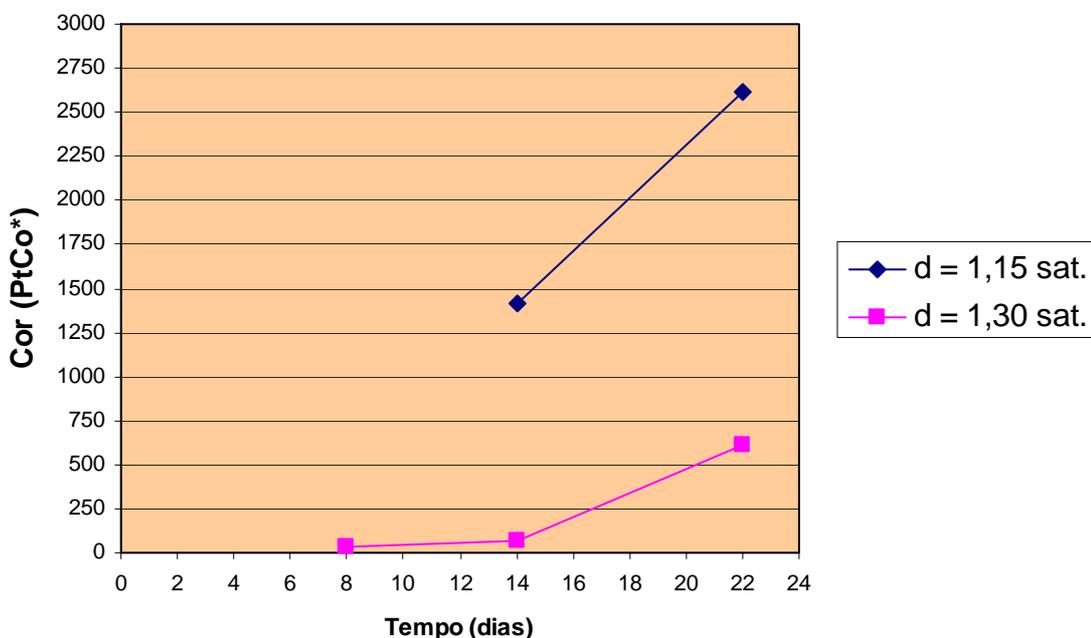


Figura 5-8: Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado nas colunas em condições saturadas (*UC: padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart).

No período não foi efetuada a determinação dos valores de Cor e Turbidez para o chorume utilizado no abastecimento das colunas, nesta primeira campanha de ensaios.

Observa-se na Figura 5-9, que para a coluna com densidade igual a 1,30, obteve-se um resultado para a Turbidez, coerente com o obtido para os demais parâmetros, porém para a coluna com densidade igual a 1,15, nota-se que obteve-se um valor inicial maior, sendo que isto pode ter sido ocasionado pelo pequeno volume efluente nesta primeira coleta para esta coluna, o qual pode ter concentrado uma quantidade maior de material carregado pelo escoamento.

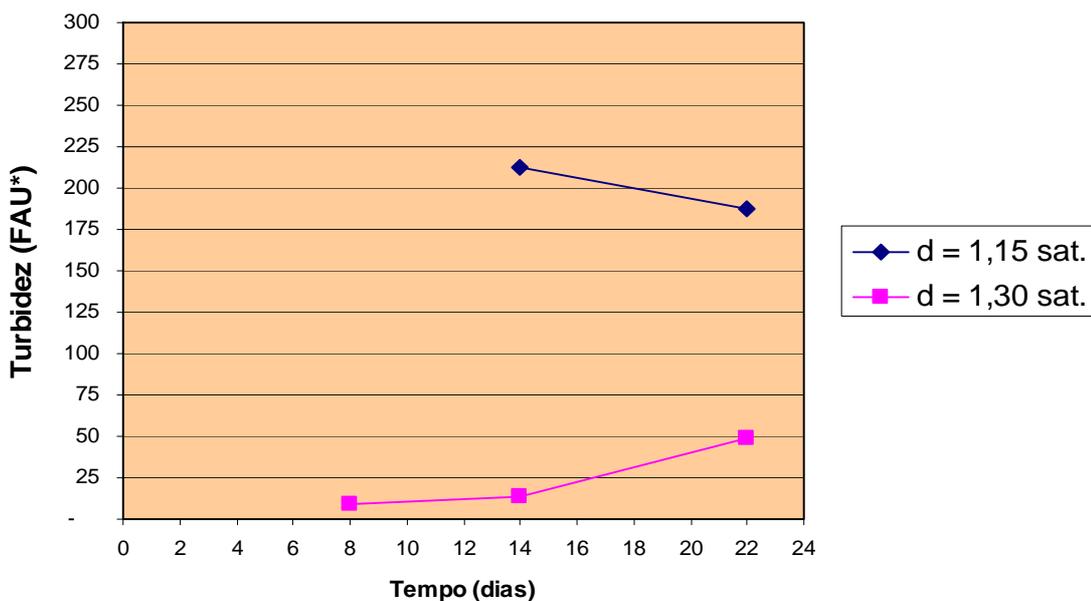


Figura 5-9: Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado nas colunas em condições saturadas (*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).

Na Figura 5-10, observa-se, analogamente aos resultados obtidos para a eficiência de remoção de DQO, que para a coluna em condições saturadas, com densidade igual à 1,30, a eficiência na remoção de Sólidos Totais, foi maior que para a coluna em condições saturadas, com densidade igual à 1,15. Nota-se ainda que, como é esperado, a eficiência do sistema vai diminuindo, em função do tempo. Conforme destacado anteriormente, a média de Sólidos Totais do chorume, no período de realização dos ensaios foi de 12.270 mg/l.

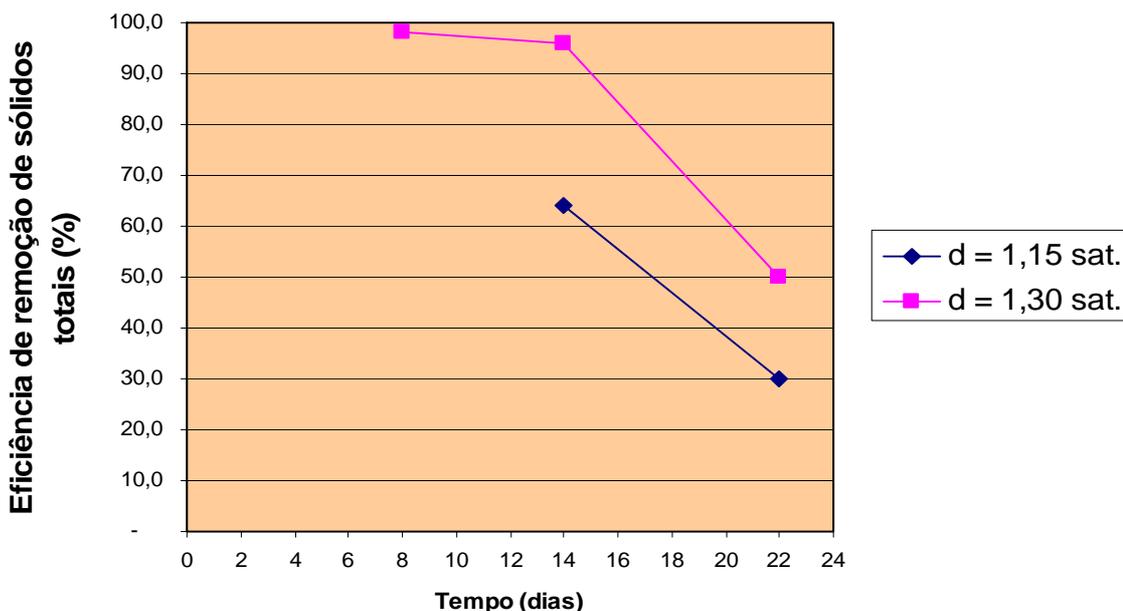


Figura 5-10: Eficiência na redução de Sólidos Totais para as colunas em condições saturadas. (mg/l).

Destaca-se, portanto, que neste primeiro ensaio com as colunas em condições saturadas, não foi possível obter-se resultados representativos para uma avaliação mais detalhada, devido ao número reduzido de coletas, não sendo possível identificar claramente os limites do sistema, e ainda, a falhas e dificuldades construtivas do sistema.

A seguir são apresentados os gráficos relativos aos resultados obtidos para os volumes aplicados e coletados, DQO, pH, Condutividade, Cor, Turbidez e Sólidos Totais, referentes as colunas com densidades de 1,15; 1,30; 1,50 e 1,67, em condições não saturadas.

A partir da Figura 5-11 à Figura 5-14, pode-se notar que inicialmente tem-se uma diferença significativa entre o volume aplicado e o volume coletado, devido ao volume necessário para o preenchimento dos vazios do solo, o que deveria diminuir em função do acréscimo da compactação, porém verifica-se na Figura 5-13, que a seqüência de acréscimo no volume inicial, comparativamente com as demais colunas, foi quebrado devido a um vazamento constatado nesta coluna, o qual foi vedado com auxílio de silicone, prosseguindo-se os ensaios.

Nota-se ainda que nas demais coletas, o volume coletado foi bem próximo ao volume aplicado, mantendo-se somente a diferença de volume inicial, porém não sendo avaliado o tempo de detenção hidráulico, devido a não ter sido marcado o tempo necessário ao escoamento do chorume aplicado.

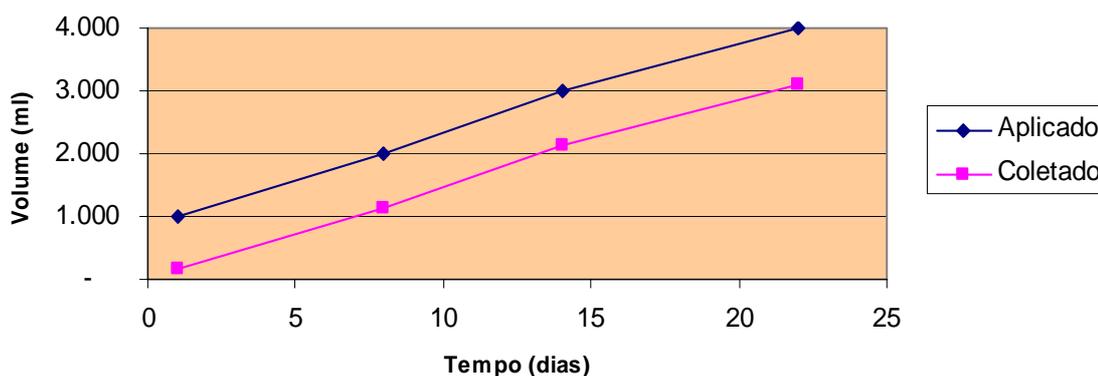


Figura 5-11: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições não saturadas

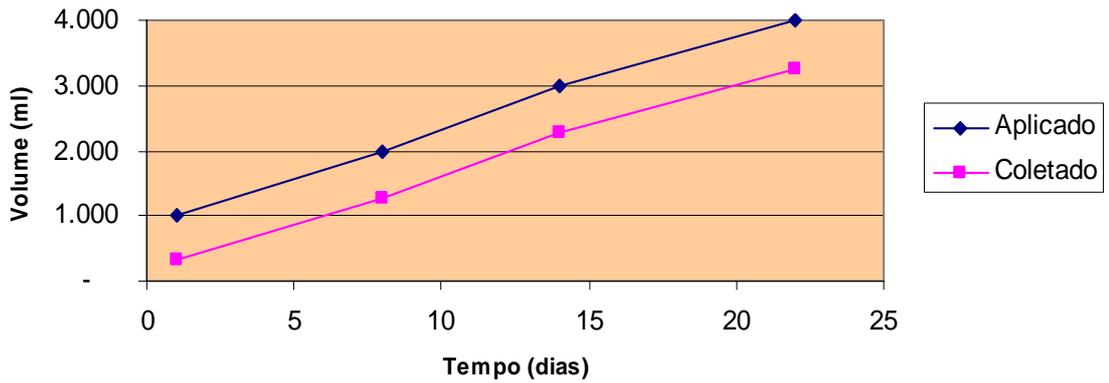


Figura 5-12: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30, em condições não saturadas

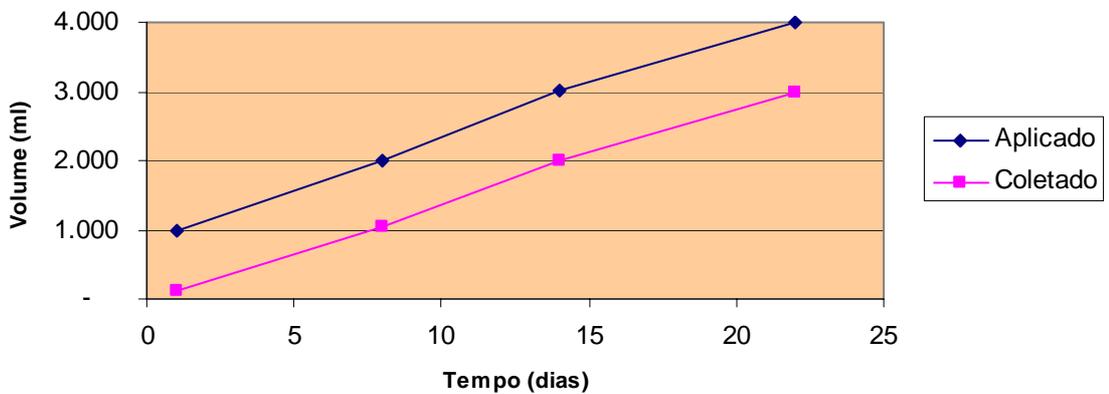


Figura 5-13: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,50, em condições não saturadas

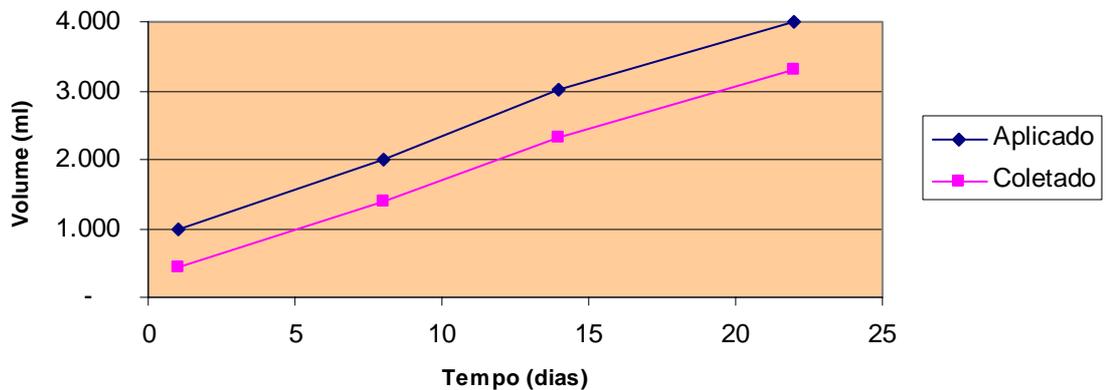


Figura 5-14: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,67, em condições não saturadas

A partir da Figura 5-15 à Figura 5-17, são apresentados os resultados relativos as análises de DQO, para as colunas em condições não saturadas, sendo que na Figura 5-15, onde é expressa a eficiência de remoção de DQO em função do tempo, nota-se claramente o ponto de inflexão do gráfico, para todas as colunas, à partir do sétimo dia, ou seja, da segunda coleta de efluente, o que representa um volume aplicado de 2 litros por coluna, ou o equivalente à aproximadamente 270 litros de chorume por metro cúbico de solo nas densidades descritas, como mostrado na Figura 5-17.

Nota-se na Figura 5-15 e na Figura 5-17, que como era esperado a eficiência do sistema, para a remoção de DQO, aumenta em função do acréscimo da densidade, sendo apresentado um resultado discrepante aos demais, para a coluna com densidade de 1,50, uma vez que conforme já descrito anteriormente, esta apresentou problemas construtivos.

Ressalta-se porém que nem sempre a coluna com maior compactação pode trazer melhores resultados em termos de carga removida, uma vez que nesta o escoamento é mais lento e o sistema é mais suscetível a colmatagem, conforme nota-se na Figura 5-16.

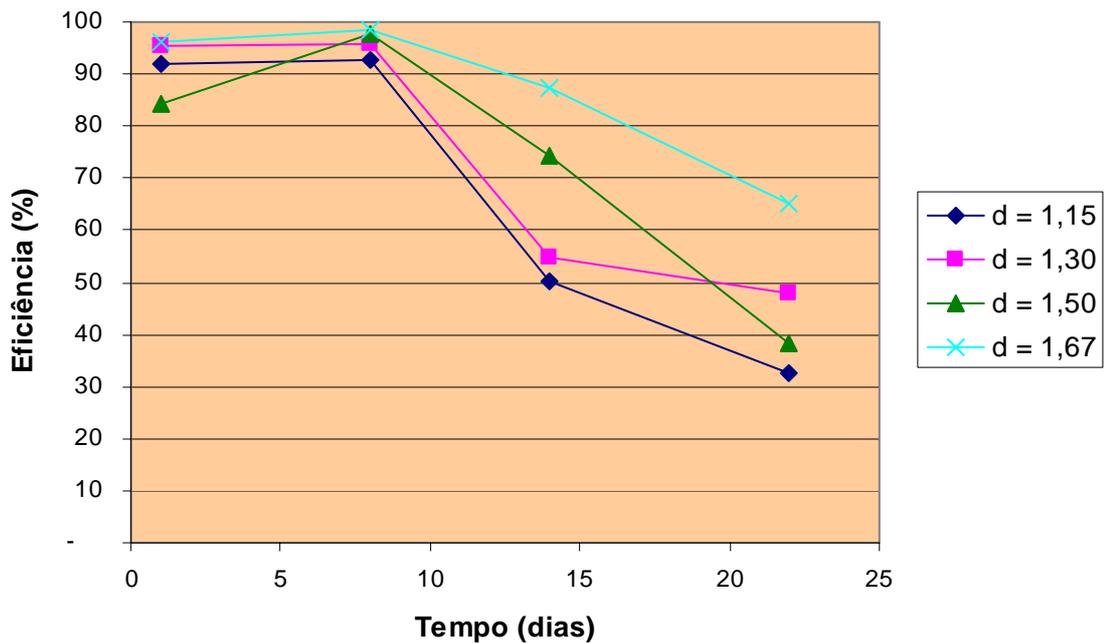


Figura 5-15: Eficiência de remoção de DQO para alimentação com intermitência semanal, com taxa de aplicação hidráulica média de $0,0193 \text{ m}^3/\text{m}^3.\text{dia}$, para as colunas em condições não saturadas.

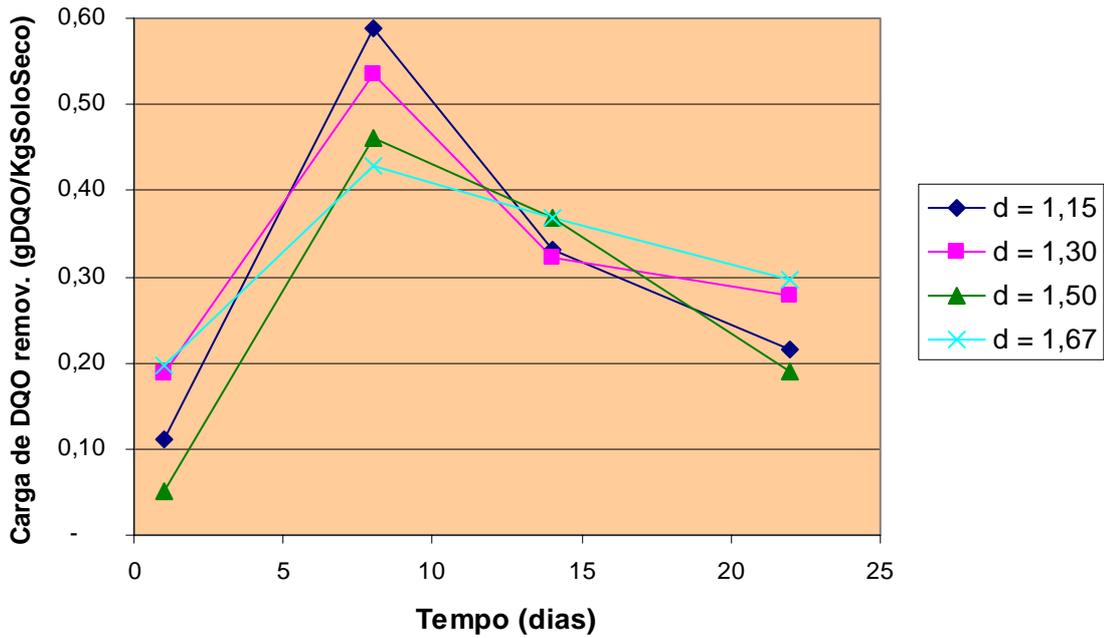


Figura 5-16: Carga de DQO removida para alimentação com intermitência semanal, com taxa de aplicação hidráulica média de $0,0193 \text{ m}^3/\text{m}^3.\text{dia}$, para as colunas em condições não saturadas.

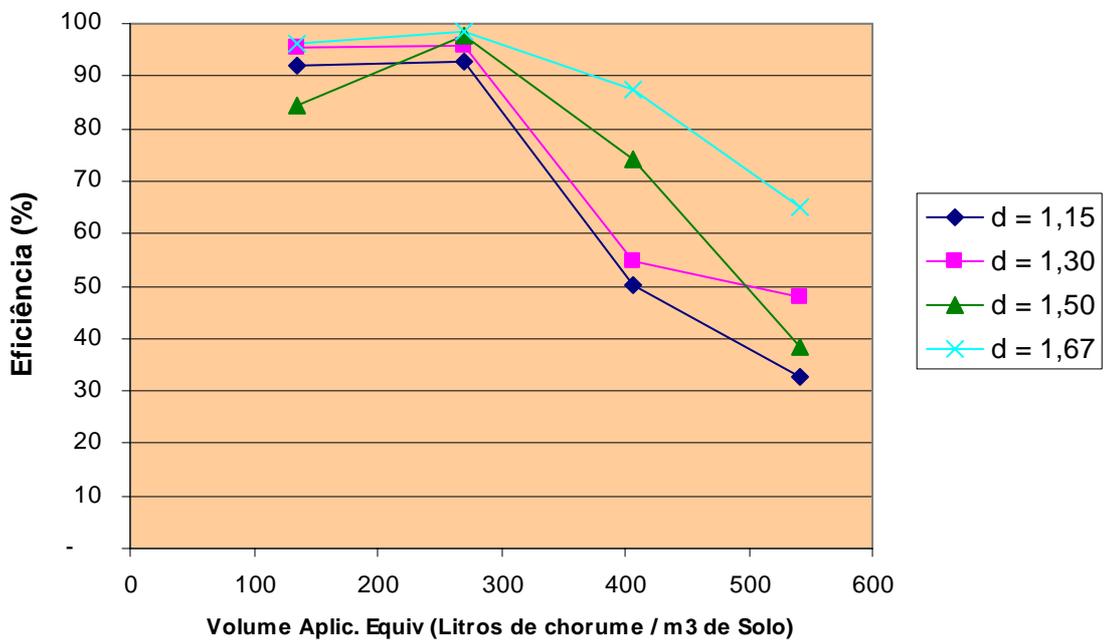


Figura 5-17: Eficiência de remoção de DQO em função do volume aplicado por metro cúbico de solo seco, para as colunas em condições não saturadas.

Na Figura 5-18 são apresentados os resultados obtidos para o pH do efluente coletado das colunas em condições não saturadas, salientando-se que o pH do chorume (afluente), no período de realização dos ensaios variou de 7,97 à 9,06, sendo destacado os valores muito variáveis, como o apresentado para a coluna com densidade de 1,67.

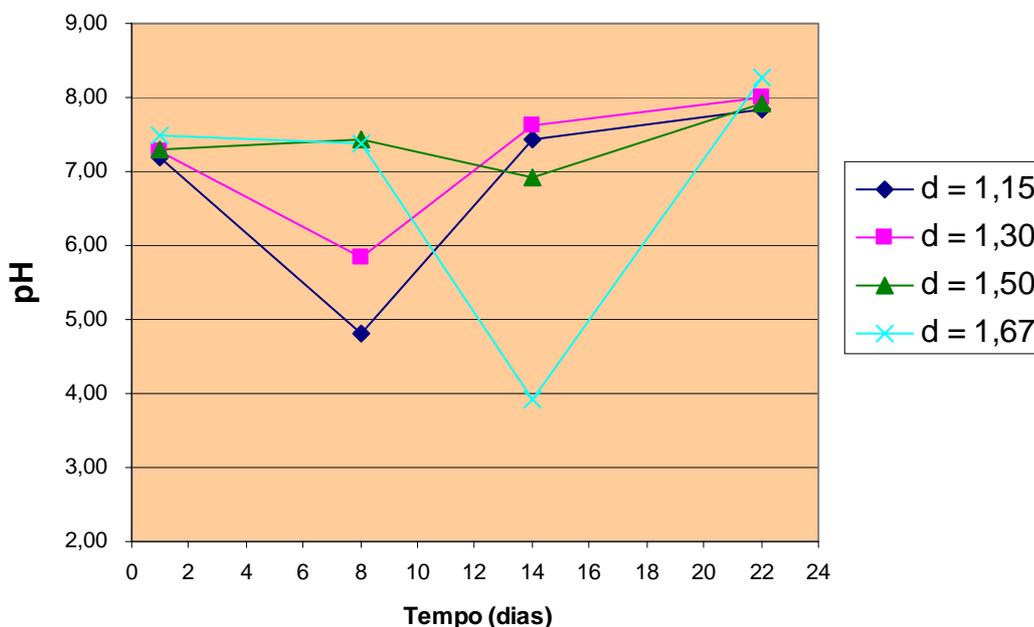


Figura 5-18: Valores do pH para as amostras coletadas do efluente das colunas não saturadas.

Considerando-se que a condutividade aumenta em função da quantidade de contaminantes existentes no efluente, na Figura 5-19, evidencia-se claramente a maior eficiência de remoção de contaminantes nas colunas com maior densidade, e ainda, conforme apontado anteriormente, observa-se o limite do sistema, próximo ao sétimo dia, ou o equivalente a aplicação de 2 litros de chorume por coluna. A Condutividade do chorume no período de realização dos ensaios variou de 6.140 à 10.700 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ($T=32^\circ\text{C}$).

Como pode-se observar, na Figura 5-20, para as colunas com densidades de 1,15; 1,30 e 1,50 em condições não saturadas, tem-se uma elevação brusca na Cor, à partir da terceira coleta de afluente, o que, para a coluna com densidade de 1,67, aconteceu somente à partir da quarta coleta, devido a maior eficiência na remoção de matéria orgânica e outros contaminantes que conferem cor ao efluente.

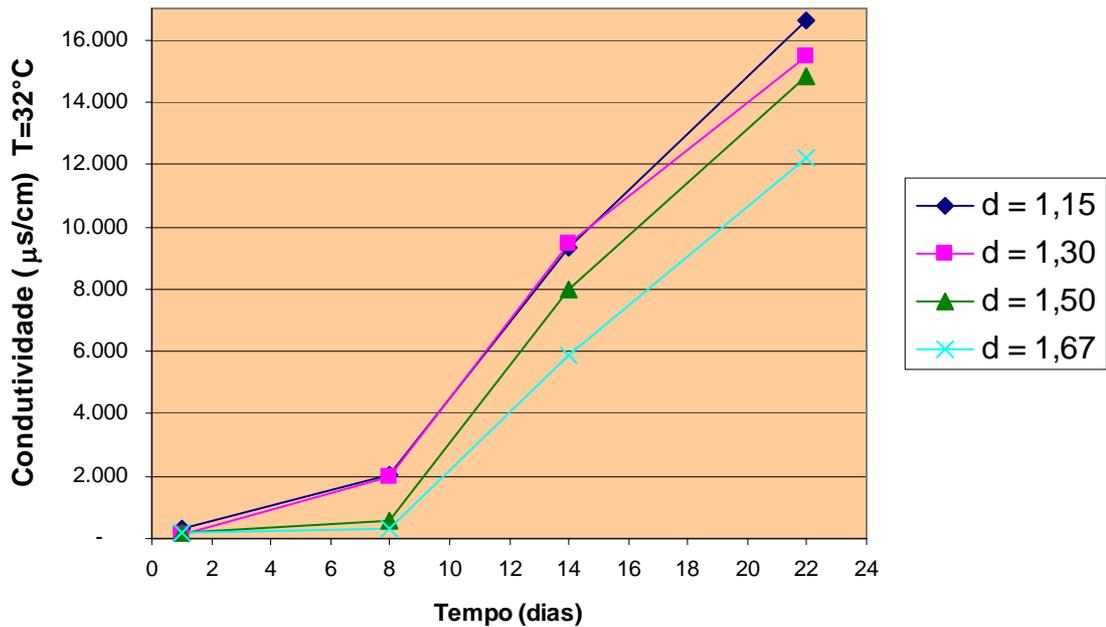


Figura 5-19: Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^\circ\text{C}$, para as amostras coletadas do efluente das colunas não saturadas

Conforme descrito anteriormente, no período não foi efetuado o ensaio para determinação dos valores de Cor e Turbidez para o chorume utilizado no abastecimento das colunas, nesta primeira companhia de ensaios.

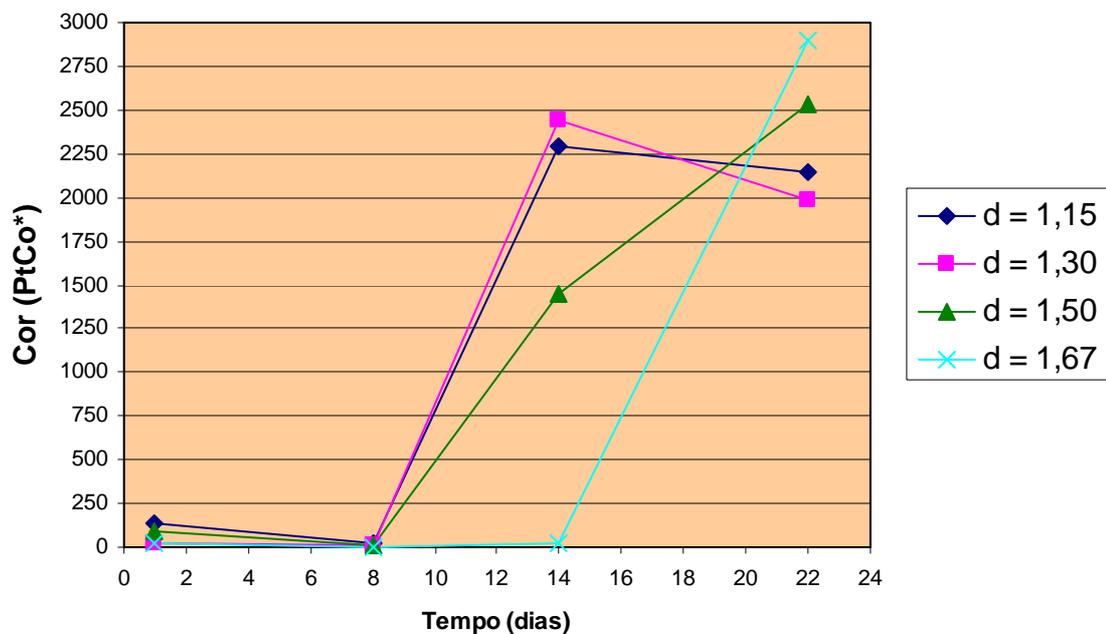


Figura 5-20: Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado nas colunas não saturadas (*UC: padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart).

Observa-se na Figura 5-21, que analogamente aos valores de Cor, os valores de Turbidez para as colunas não saturadas tiveram um aumento brusco à partir da terceira coleta, excetuando-se a coluna com densidade de 1,67, que aumentou somente à partir de quarta coleta. Ressalta-se ainda que após um aumento brusco, houve uma nova queda nos valores, o que pode ter ocorrido em função do carreamento de partículas finas do solo, o qual teria tendência de ter um alto valor inicial e ir diminuindo em função do tempo, o que se acredita que aconteceria também com a coluna com densidade de 1,67, se o ensaio tivesse continuidade.

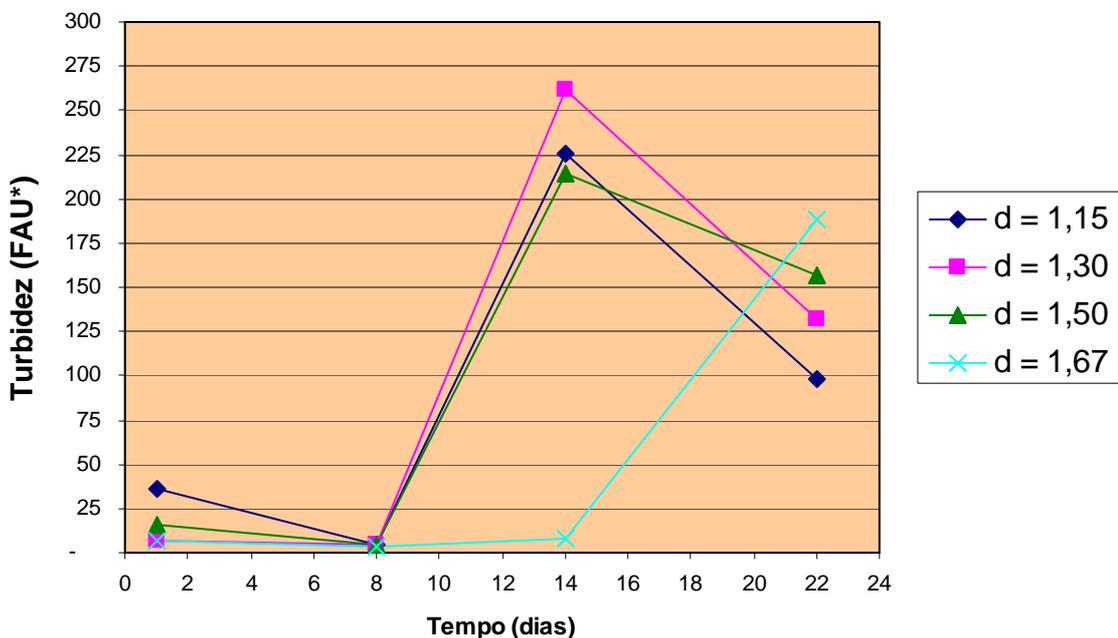


Figura 5-21: Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado das colunas não saturadas (*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).

Na Figura 5-22, observa-se que para as colunas em condições não saturadas, com maior densidade a eficiência na remoção de Sólidos Totais foi maior. Nota-se ainda que como é esperado, a eficiência do sistema vai diminuindo, em função do tempo, tendo uma queda brusca à partir da terceira coleta.

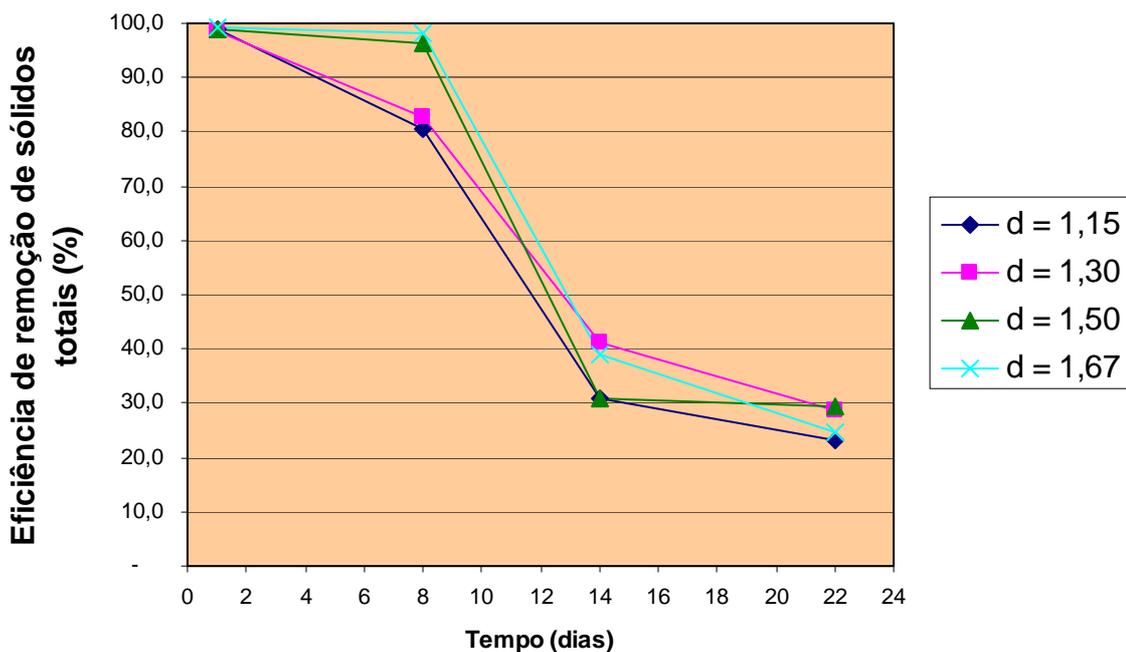


Figura 5-22: Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l), no efluente das colunas em condições não saturadas.

5.2 SEGUNDA CAMPANHA DE ENSAIOS

Conforme descrito no capítulo anterior, para a segunda campanha de ensaios, adotou-se as mesmas condições de compactação da primeira etapa, ou seja, duas colunas em condições saturadas com densidades de 1,15 e 1,30, e 4 colunas em condições não saturadas com densidades de 1,15; 1,30; 1,50 e 1,67, alimentando-as com um volume de 0,250 litro de chorume por dia, de segunda à sexta feira, o que representa uma taxa concentrada diária de $0,034 \text{ m}^3\text{chorume}/\text{m}^3\text{SoloSeco}$, sendo avaliados os parâmetros DQO, sólidos totais, pH, condutividade, cor e turbidez.

Esta segunda campanha dividiu-se em 3 etapas, cujos resultados são apresentados e discutidos à seguir.

Primeira Etapa

Esta primeira etapa ocorreu no período de 05/12/2003 à 13/01/2004, quando foi efetuado o abastecimento com chorume por 18 (dezoito) vezes em (quarenta) dias

consecutivos, ressaltando-se que houve uma paralisação na alimentação e nos ensaios, no período de 20/12/2003 à 06/01/2004.

Destaca-se que as características das colunas de percolação nesta etapa, foram iguais à da primeira campanha de ensaios, as quais encontram-se especificadas na Tabela 5-1.

Ressalta-se que se utilizou nos cálculos da eficiência e da carga removida, a DQO média do chorume, ou seja, 2.869 mg/l, obtida com a realização de ensaios periódicos durante toda a campanha.

Para as análises preliminares do afluente (chorume) utilizado no abastecimento das colunas nesta primeira etapa da segunda campanha de ensaios, obteve-se o valor de Cor igual à 5.200,0 PtCo, e de Turbidez igual à 322,0 FAU, sendo que a média de dos valores de Sólidos Totais do chorume, no período de realização dos ensaios foi de 9.856 mg/l.

Os resultados desta campanha de ensaios são apresentados nos gráfico à seguir, separadamente para as colunas em condições saturadas e não saturadas, sendo primeiramente mostrado os gráficos referentes as colunas com densidades de 1,15 e 1,30 saturadas. Em anexo são apresentadas as tabelas detalhadas das análises.

Na Figura 5-23 e na Figura 5-24 pode-se notar a o grande intervalo de tempo entre o primeiro abastecimento e a primeira amostragem, devido ao volume necessário para o preenchimento dos vazios do solo, para que se atinja a saturação do mesmo, o que claramente é mais rápido para a coluna com densidade de 1,30, devido ao menor volume de vazios do solo.

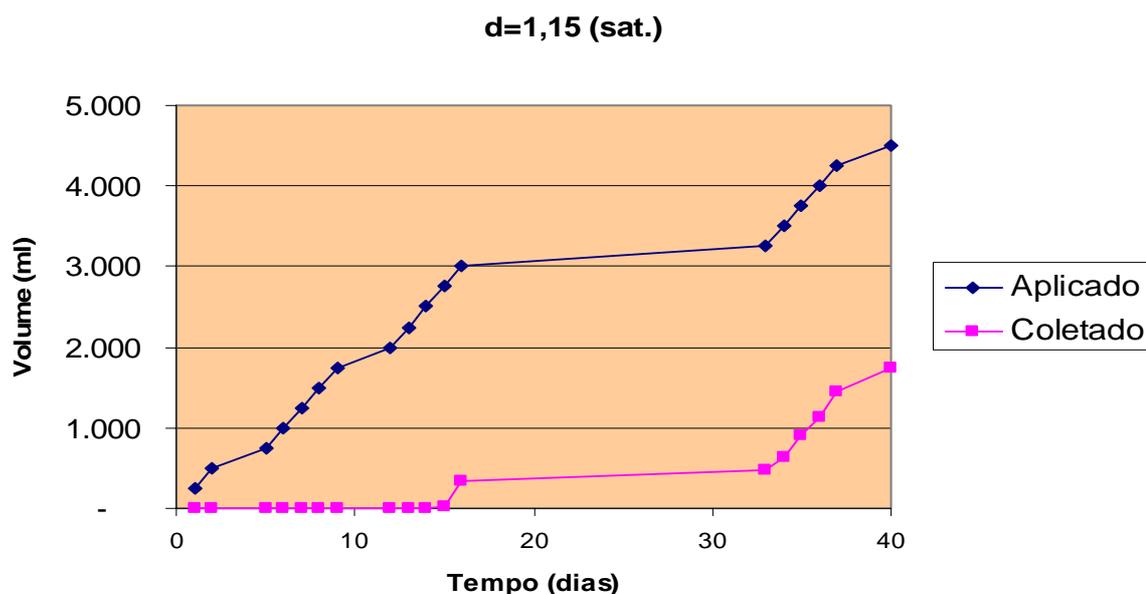


Figura 5-23: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições saturadas.

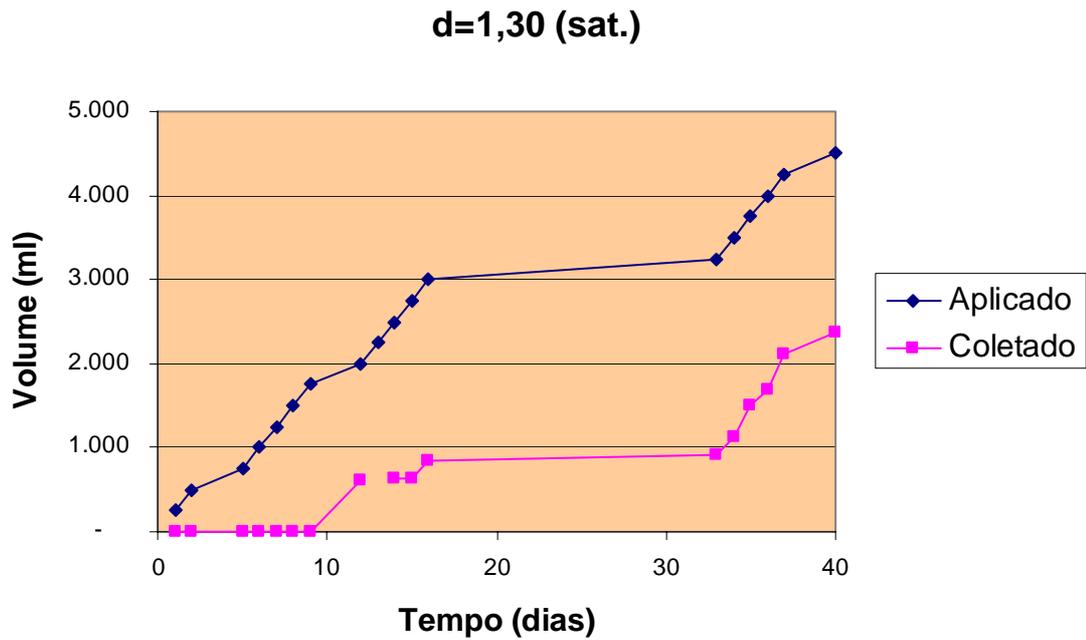


Figura 5-24: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30, em condições saturadas.

Na Figura 5-25 observa-se resultados iniciais discrepantes para as duas colunas, porém evidencia-se que após um período de paralisação nos ensaios, ambas as colunas tem uma recuperação na eficiência, seguida novamente de resultados anômalos.

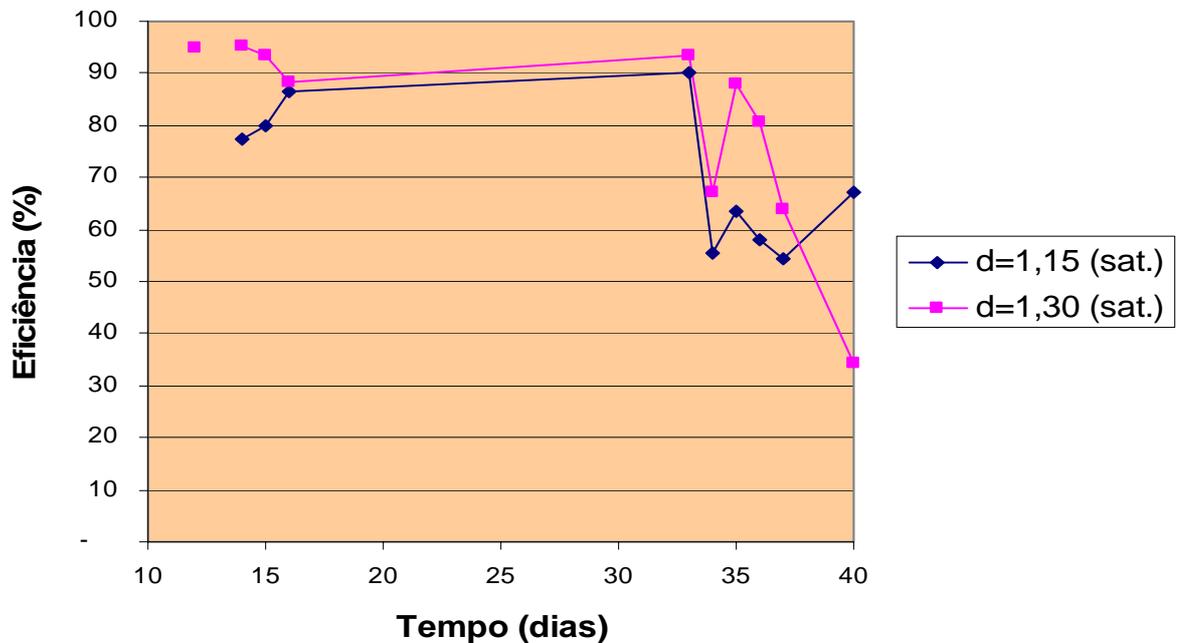


Figura 5-25: Eficiência de remoção de DQO para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3 \text{ chorume} / \text{m}^3 \text{ SoloSeco}$

Comparando-se a Figura 5-26 e a Figura 5-27 nota-se que apesar da coluna com densidade de 1,30 apresentar uma eficiência maior na remoção de DQO, se considerarmos a carga de DQO removida por quilo de solo, obtém-se resultados anômalos, porém em alguns momentos estes são maiores para a coluna com densidade de 1,15.

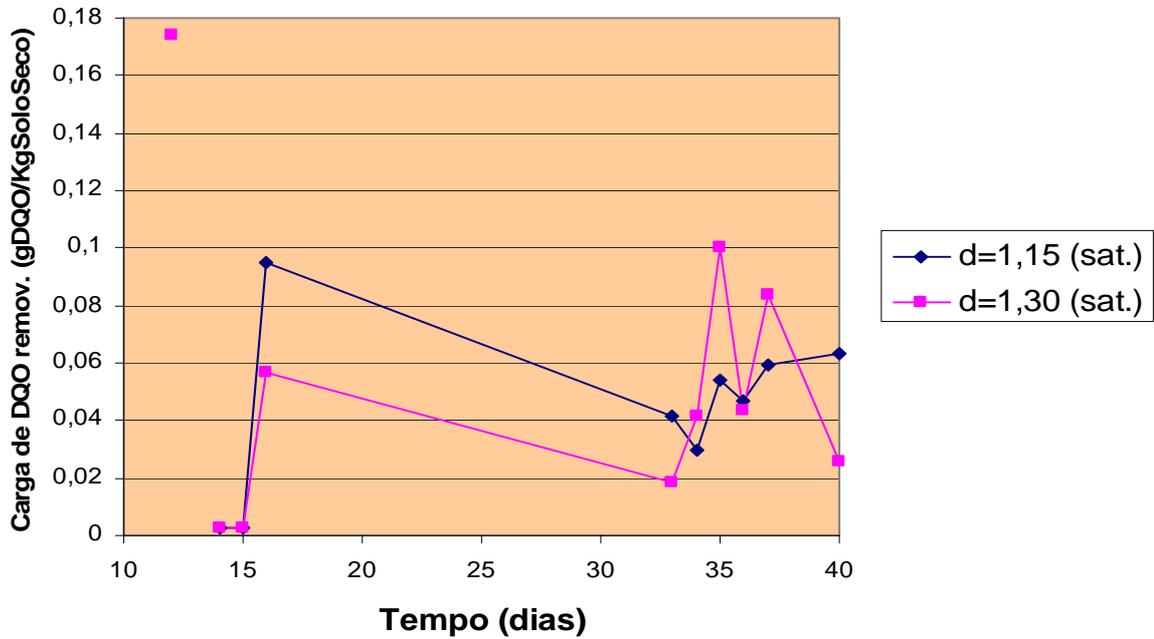


Figura 5-26: Carga de DQO removida para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3 \text{ chorume/m}^3 \text{ SoloSeco}$

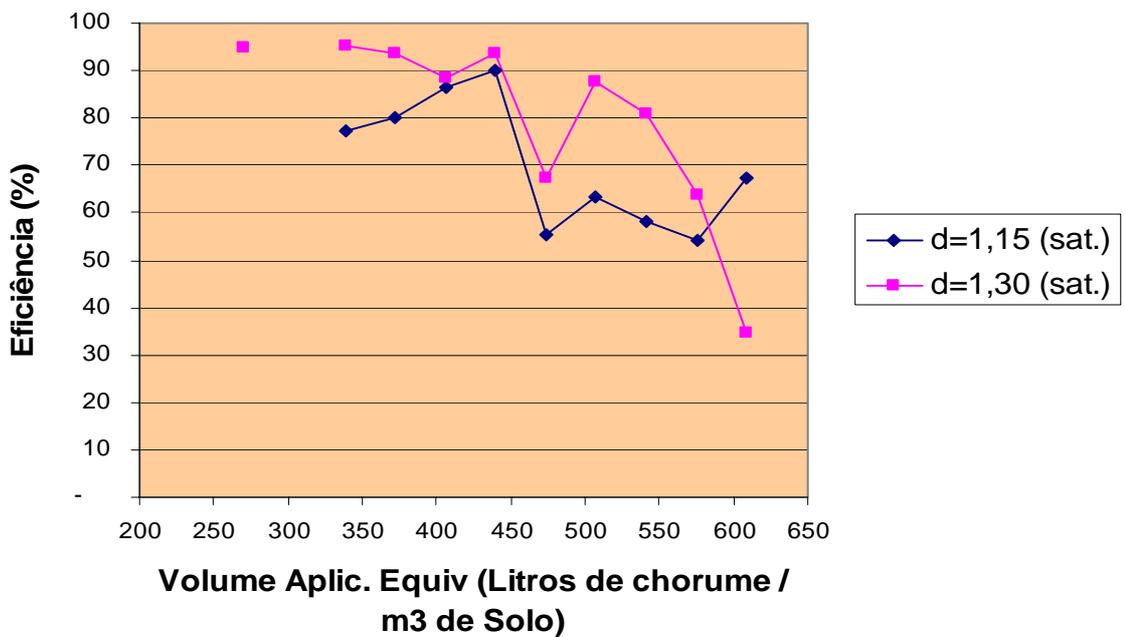


Figura 5-27: Eficiência de remoção de DQO em função do volume aplicado por metro cúbico de solo seco.

Na Figura 5-28 e na Figura 5-29 nota-se que obteve-se baixos valores iniciais de Cor e Turbidez, comparando-se com os valores do afluente de Cor igual à 5.200,0 PtCo e de Turbidez igual à 322,0 FAU, porém após o período de paralisação dos ensaios nota-se que houve uma elevação muito brusca nos valores devido ao arraste de finos do solo, o que era visualmente perceptível, pela coloração avermelhada do efluente.

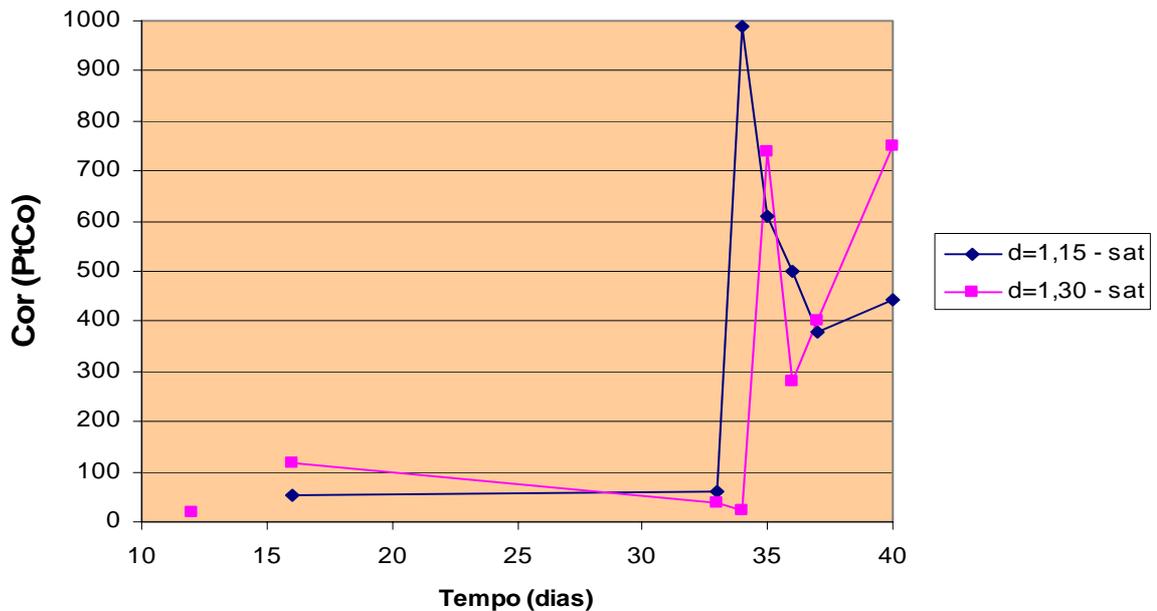


Figura 5-28: Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado (*UC: padrão relativo ao PtCo-Platinum - Cobalt Units Standart).

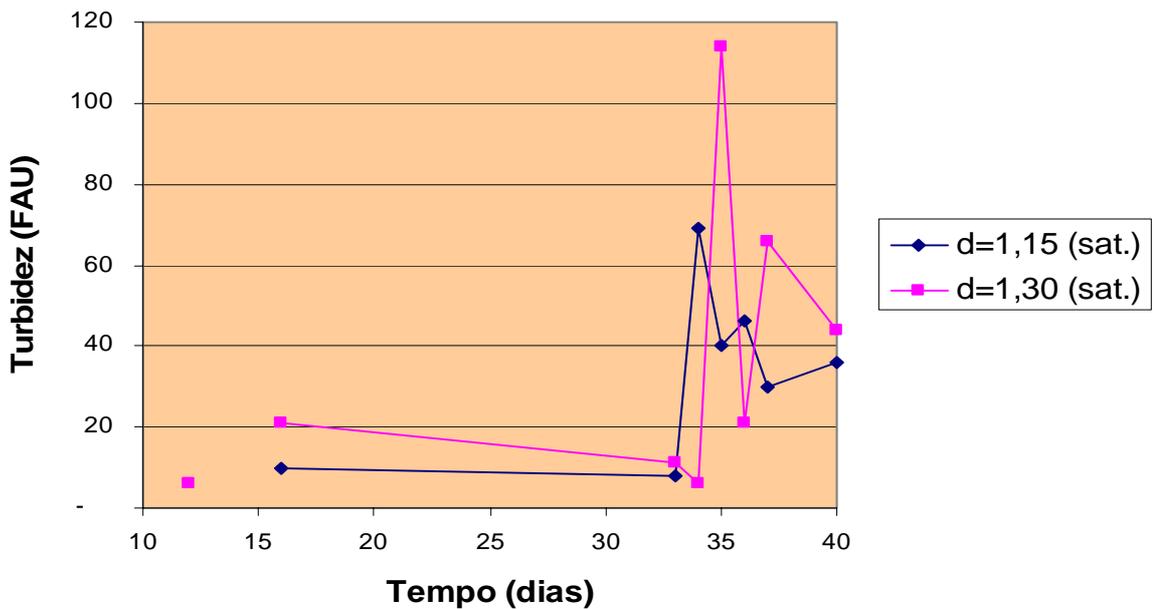


Figura 5-29: Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado(*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).

Na Figura 5-30 observa-se, analogamente aos resultados obtidos para a eficiência de remoção de DQO, que para a coluna em condições saturadas, com densidade igual à 1,30, a eficiência na remoção de Sólidos Totais, foi maior que para a coluna em condições saturadas, com densidade igual à 1,15. Nota-se ainda que como é esperado, a eficiência do sistema vai diminuindo, em função do tempo. Conforme destacado anteriormente a média de Sólidos Totais do chorume, no período de realização dos ensaios foi de 9.856,0 mg/l.

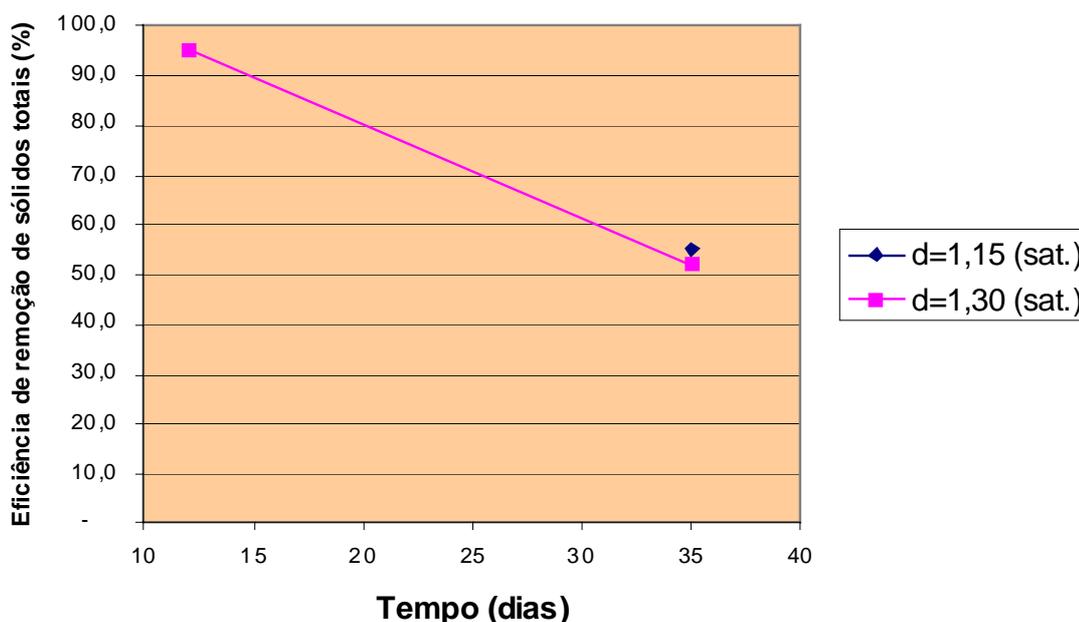


Figura 5-30: Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l), no efluente das colunas em condições saturadas.

Verifica-se, portanto, que novamente, para esta segunda campanha de ensaios, não foram obtidos resultados significativos à uma avaliação mais criteriosa do sistema, devido ao número reduzido de amostragens e a discrepância dos resultados.

A seguir são apresentados os gráficos relativos aos resultados obtidos para os volumes aplicado e coletado, DQO, pH, Condutividade, Cor, Turbidez e Sólidos Totais, referentes as colunas com densidades de 1,15; 1,30; 1,50 e 1,67, em condições não saturadas.

Na Figura 5-31 à Figura 5-34, são apresentados os resultados da medição dos volumes aplicados e coletados, para as colunas em condições não saturadas, nesta segunda campanha de ensaios, sendo destacado que pode-se notar um resultado satisfatório, em termos de velocidade do escoamento, para estas colunas, ficando somente a coluna com densidade de 1,67, com uma defasagem significativa entre os volumes aplicado e coletado, devido a

colmatagem do sistema, o que fez com que acumulasse afluente na parte superior a coluna durante a fase final da referida campanha.

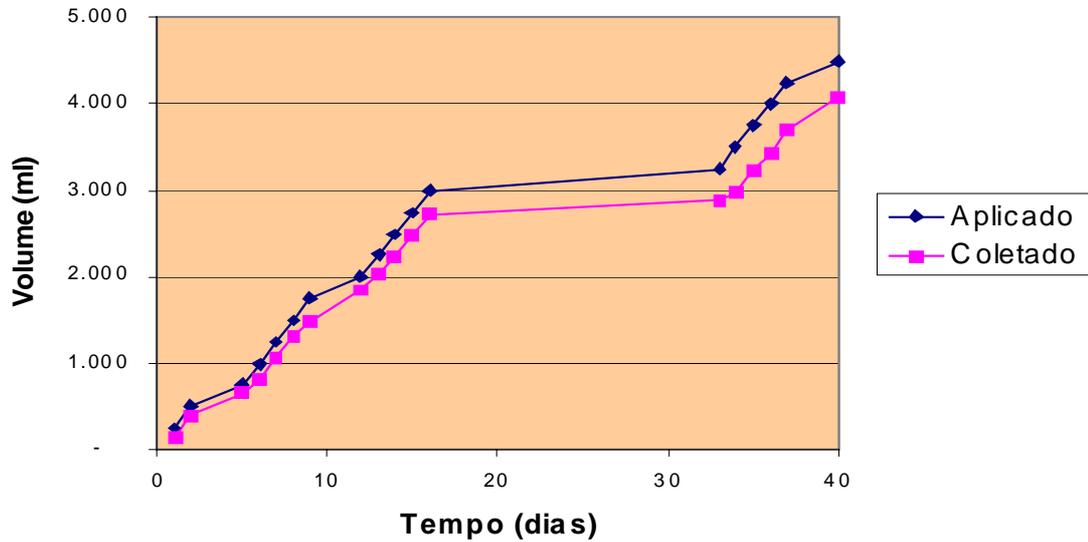


Figura 5-31: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições não saturadas

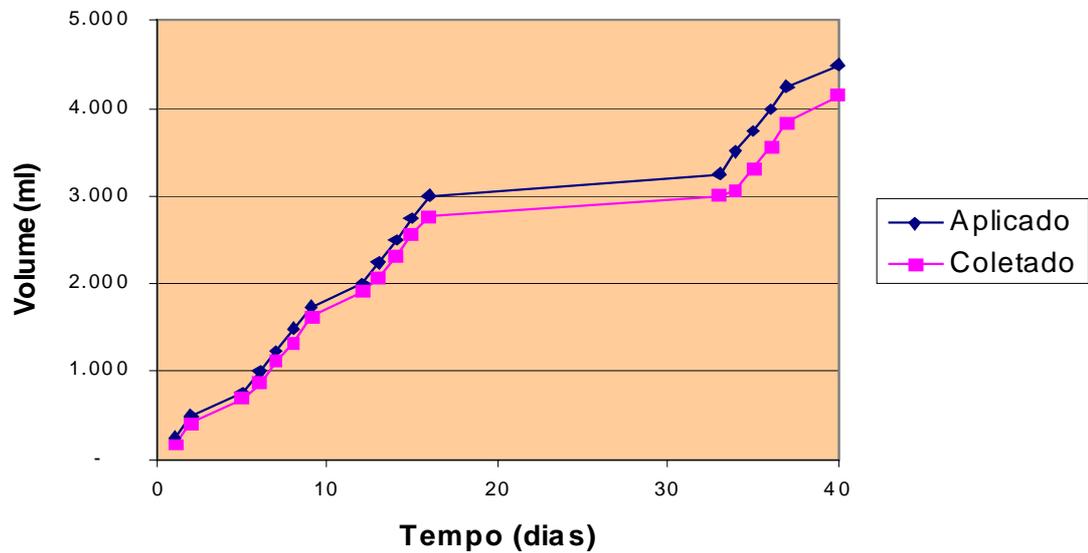


Figura 5-32: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30, em condições não saturadas

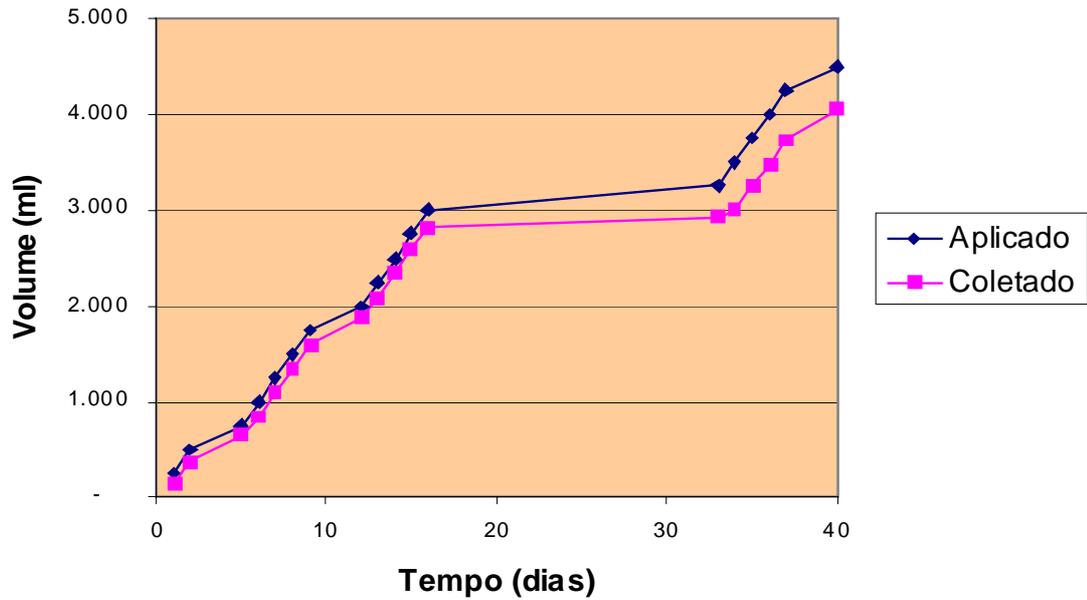


Figura 5-33: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,50, em condições não saturadas

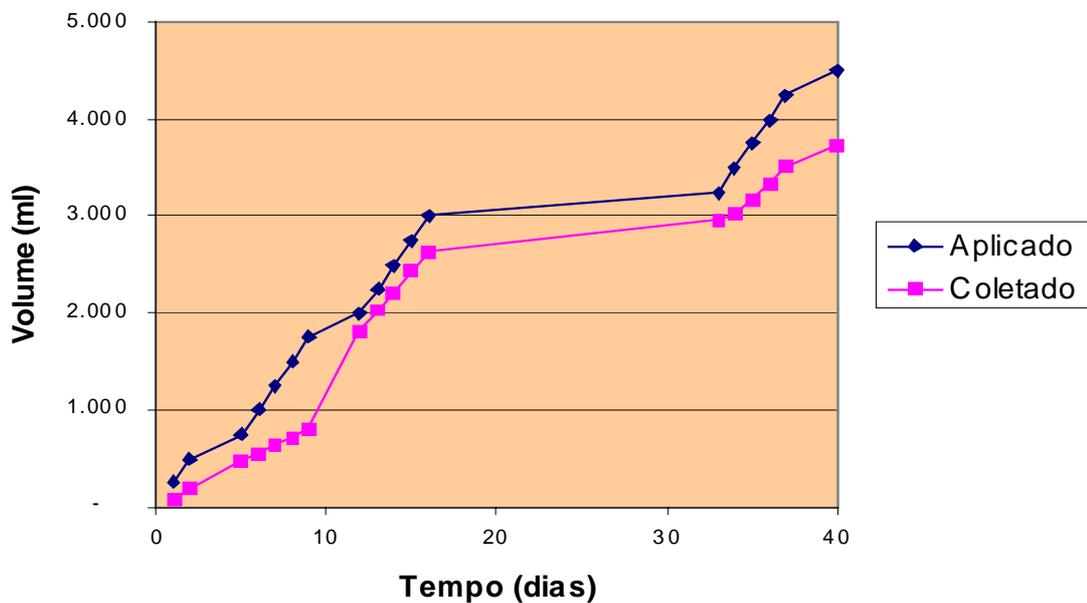


Figura 5-34: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,67, em condições não saturadas

Na Figura 5-35 à Figura 5-37 são representados os resultados dos cálculos pertinentes as análises de DQO efetuadas com os efluentes das colunas alimentadas com chorume, o qual apresentou, no período de realização dos ensaios, uma DQO média de 2.868 mg/l. Nota-se que após um período de paralisação nos ensaios, o sistema promoveu um arraste de material,

chegando-se a obter um efluente com uma carga de DQO maior que o afluente, porém depois observa-se que o sistema recupera um pouco.

Avaliando-se as respostas das alimentações diárias, apresentadas nestas figuras, denota-se claramente o limite do sistema, com queda na eficiência de todas as colunas a partir do 12º dia. Contudo, as duas colunas com densidades aparentes de 1,15 e 1,30 apresentaram declínio bem mais acentuado na eficiência de remoção de DQO. O ponto de inflexão é representado pela carga de DQO total aplicada de 0,00635 kg. Este valor implica em uma carga limite de 0,858 kg/m³ de solo, podendo ser um pouco mais elevada para solos com densidade aparente acima de 1,67.

Nota-se ainda que a obtenção de eficiências negativas, após a saturação das colunas, provavelmente seja decorrente do arraste da matéria orgânica anteriormente retida.

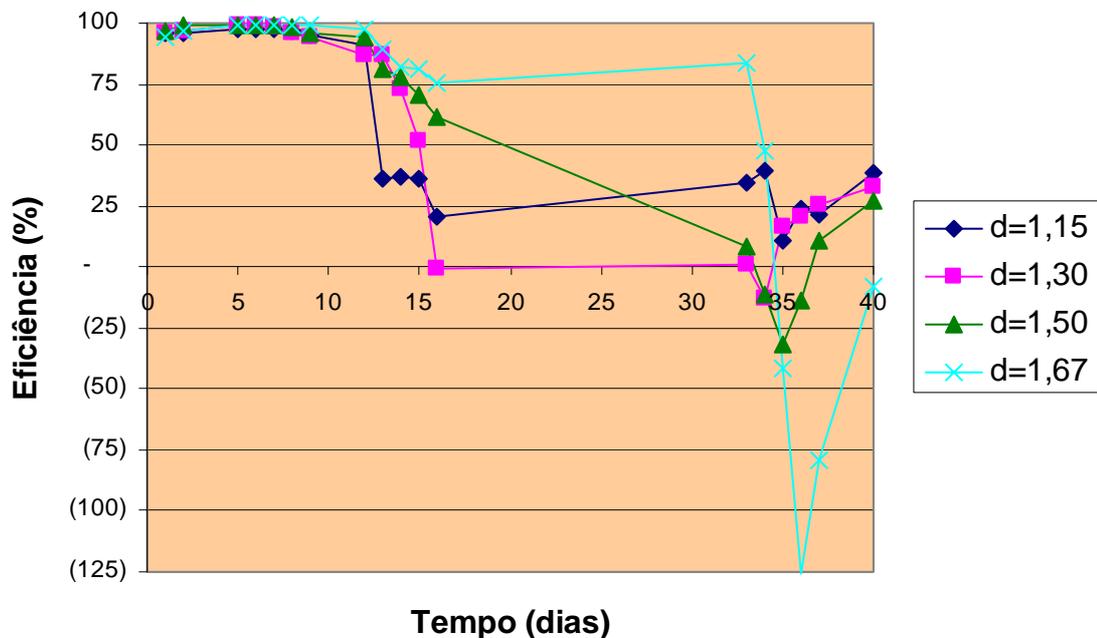


Figura 5-35: Eficiência de remoção de DQO para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de 0,034 m³(chorume)/m³(solo seco).

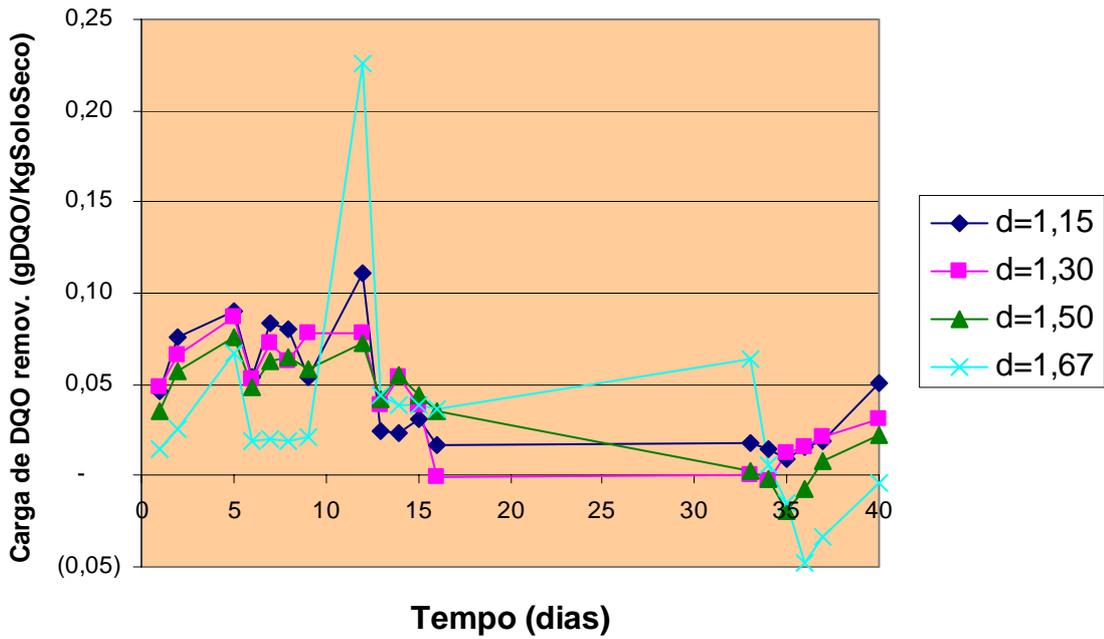


Figura 5-36: Carga de DQO removida para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3(\text{chorume})/\text{m}^3(\text{SoloSeco})$.

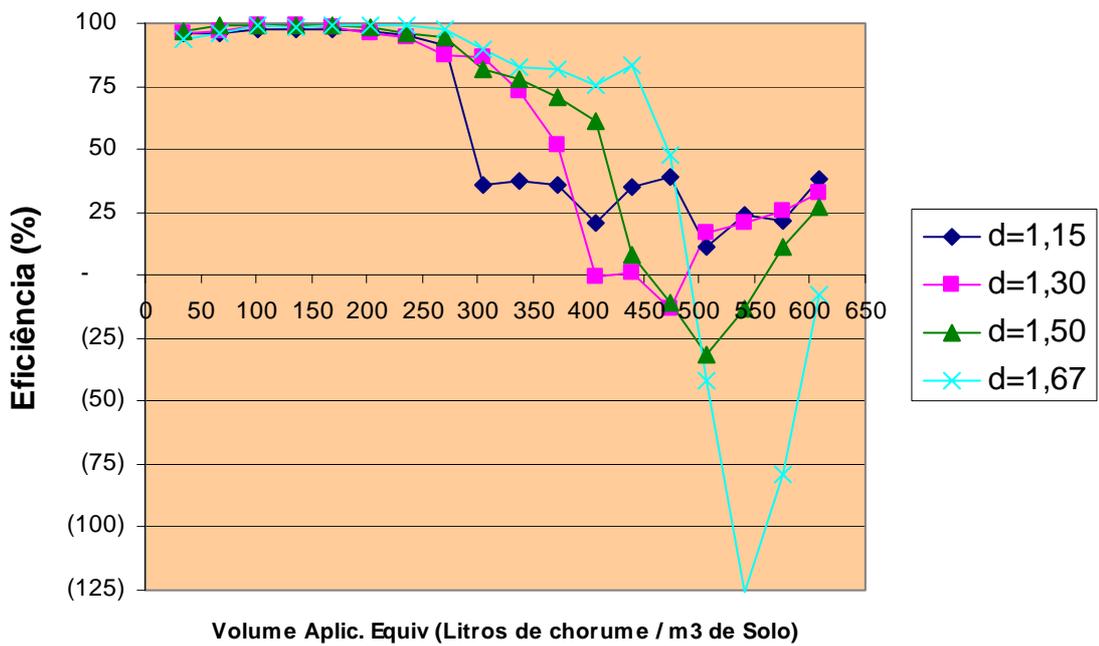


Figura 5-37: Eficiência de remoção de DQO em função do volume aplicado por m^3 de solo seco.

Na Figura 5-38 e na Figura 5-39, são apresentados os valores de Cor e da Turbidez, respectivamente, do efluente coletado nas colunas em condições não saturadas, para o abastecimento com chorume.

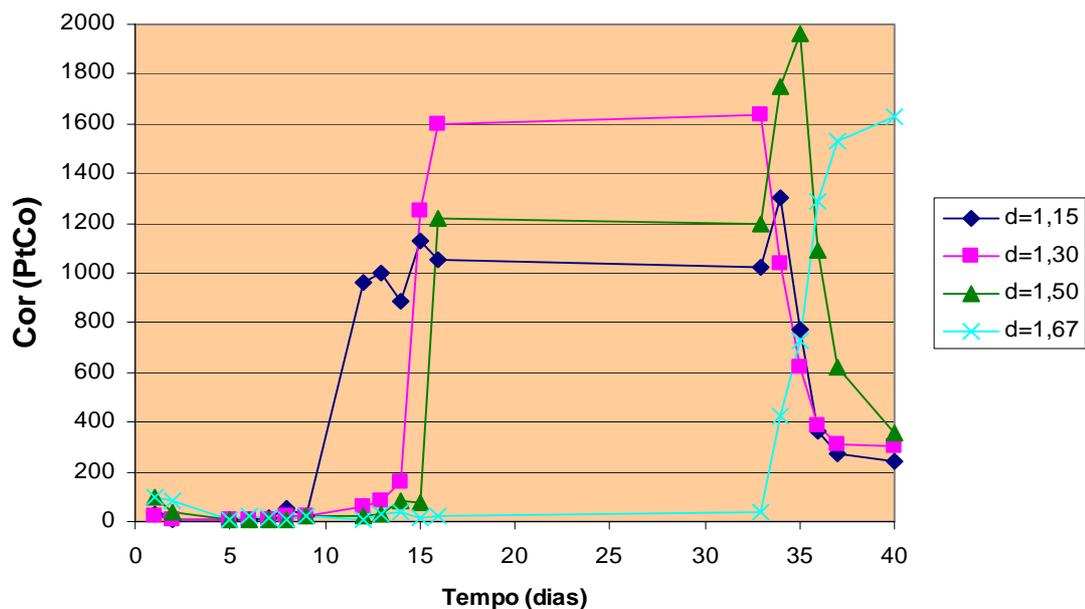


Figura 5-38: Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado nas colunas não saturadas (*UC: padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart).

Ressalta-se que o valor inicial da Cor para o efluente (chorume) utilizado no abastecimento das colunas, foi de 5.200 PtCo, e o valor de Turbidez foi de 322,0 FAU, portanto observa-se que até a saturação das colunas, são obtidos resultados de Cor e Turbidez, muito próximos de zero, e ainda, mesmo após a saturação, observa-se reduções próximas a cinquenta por cento.

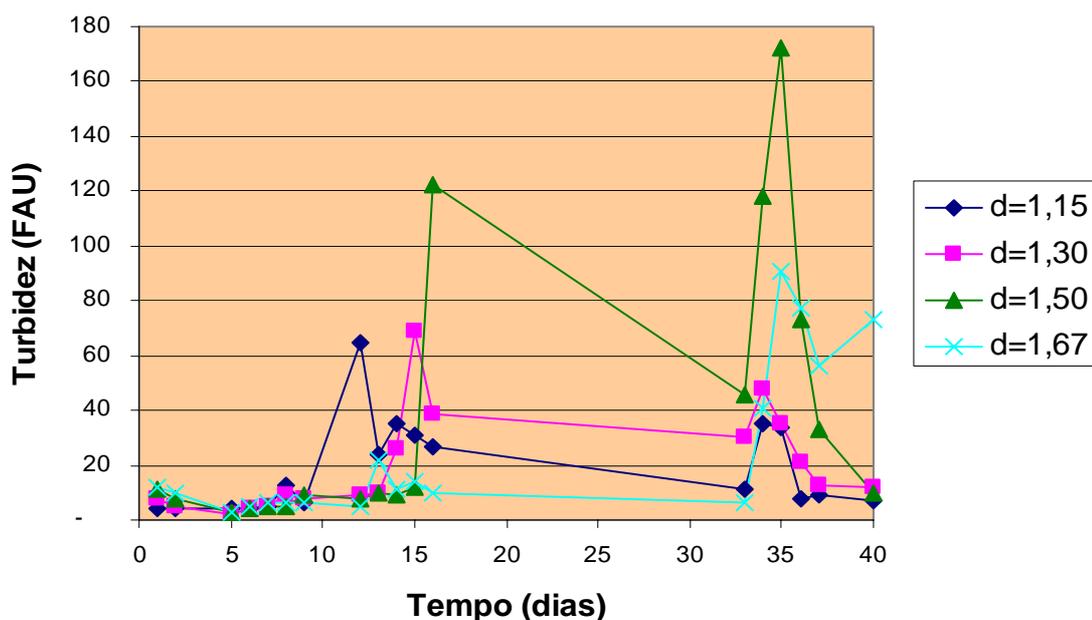


Figura 5-39: Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado das colunas não saturadas (*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).

Na Figura 5-40 são apresentados os resultados obtidos para a eficiência na remoção de Sólidos Totais, sendo que conforme destacado anteriormente a média de Sólidos Totais do chorume, no período de realização dos ensaios foi de 9.856 mg/l.

Observa-se que coerentemente as colunas com maior densidade possuem maior capacidade de retenção de sólidos totais, porém também são mais susceptíveis a colmatação, dificultando o escoamento.

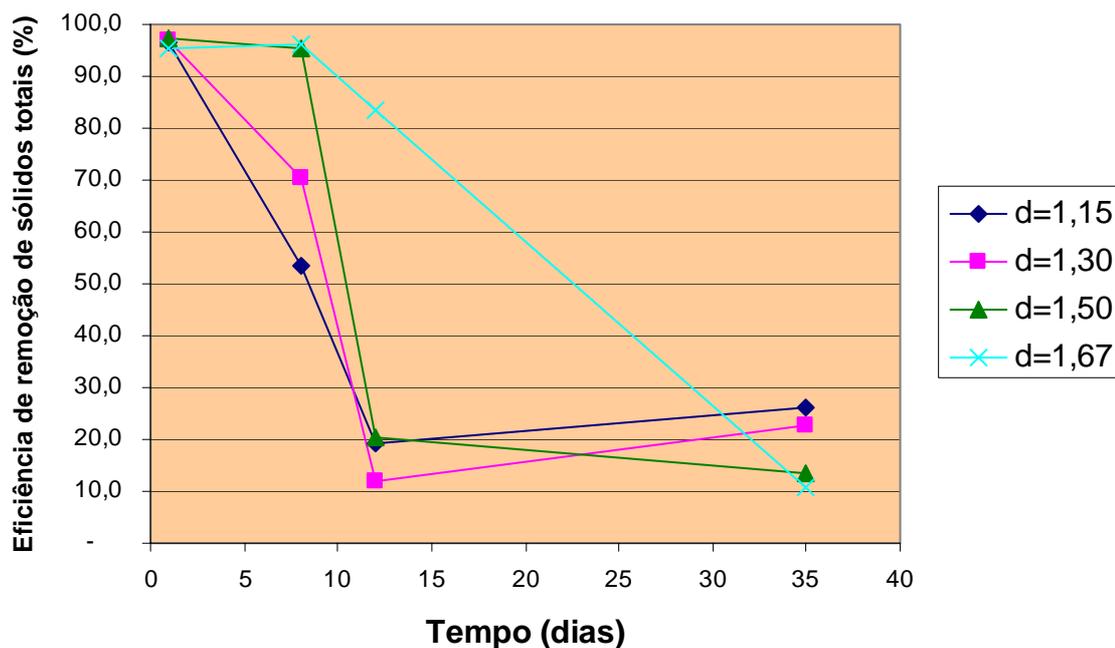


Figura 5-40: Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l), no efluente das colunas em condições não saturadas.

Segunda Etapa

Conforme descrito anteriormente, esta segunda etapa da segunda campanha de ensaios ocorreu no período de 14/01/2004 à 28/02/2004, e consistiu-se em 26 (vinte e seis) abastecimentos com água, em 46 (quarenta e seis) dias, com o mesmo volume de chorume, ou seja, 0,25 litros por abastecimento, sendo os resultados destas etapas apresentados e discutidos abaixo. Ressalta-se que houve uma paralisação no ensaio no período de 24/01/2004 à 06/02/2004.

Destaca-se que esta etapa foi uma seqüência da primeira, portanto as características das colunas de percolação, foram iguais à da primeira campanha de ensaios, as quais encontram-se especificadas na Tabela 5-1.

O objetivo desta etapa do ensaio, seria simular a utilização deste material na cobertura do aterro, após este ter sido utilizado no tratamento do chorume, verificando-se assim os impactos causados pela lixiviação deste material pela ação das chuvas, no efluente gerado.

Salienta-se que foram realizadas análises de DQO da água utilizada no abastecimento, porém obtendo-se valores iguais ou muito próximos à zero, portanto considerou-se que a água utilizada era isenta de carga orgânica.

O pH médio da água, no período de realização dos ensaios foi igual à 8,26. O valor médio da Condutividade da água, no período de realização dos ensaios foi igual à 112,3 $\mu\text{s}/\text{cm}$. A média do valor de Sólidos Totais da água no período foi igual à 128 mg/l.

Os resultados são apresentados nos gráfico à seguir, separadamente para as colunas em condições saturadas e não saturadas, sendo primeiramente mostrado os gráficos referentes as colunas com densidades de 1,15 e 1,30 saturadas. Em anexo são apresentadas as tabelas contemplando todos os resultados obtidos.

Na Figura 5-41 e na Figura 5-42, são apresentadas a relações do volume aplicado e coletado para as colunas em condições saturadas com densidade de 1,15 e 1,30 respectivamente, sendo destacado que devido a esta etapa ser uma seqüência de alimentação, não houve, conforme verificado nos outros ensaios uma defasagem inicial entre estes volumes devido as colunas já encontrar-se saturadas, porém é visível que houve a colmatação da coluna com densidade de 1,30, prejudicando a continuidade do ensaio, devido ao acúmulo de água na parte superior da coluna, face a diminuição do escoamento.

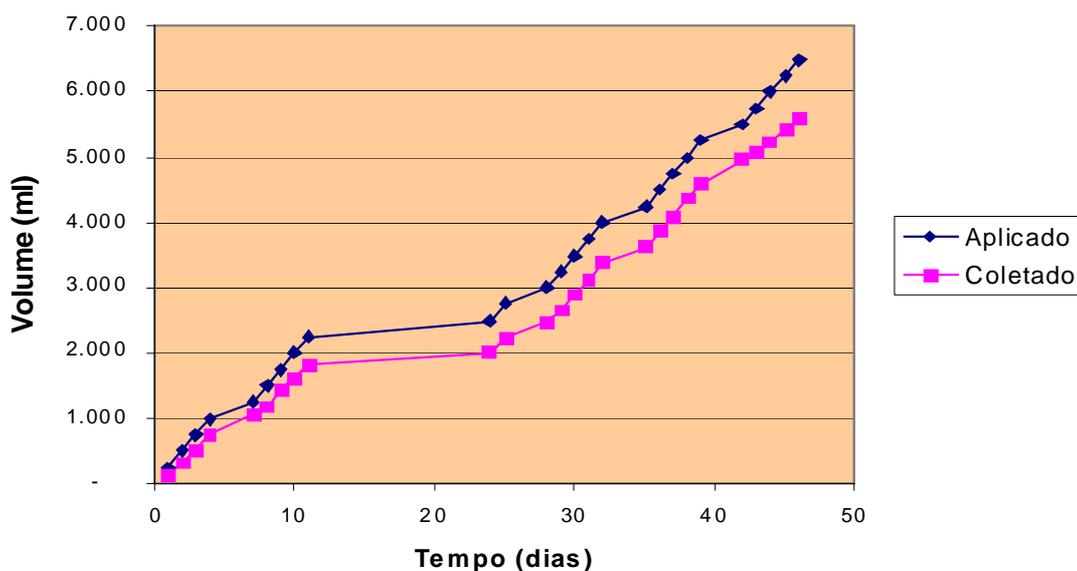


Figura 5-41: Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições saturadas.

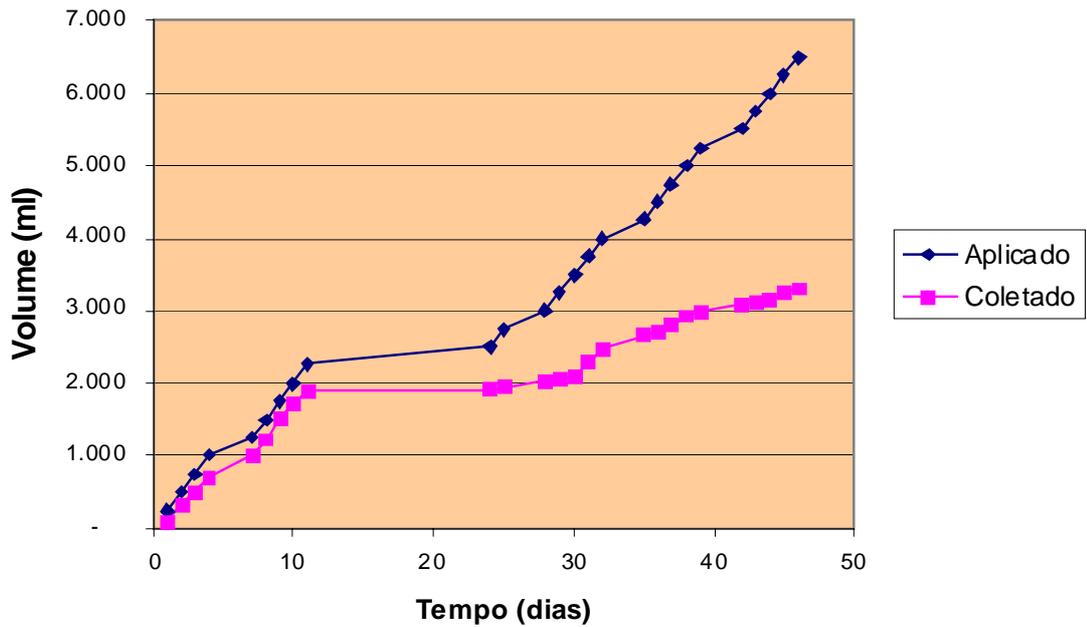


Figura 5-42: Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30, em condições saturadas.

Na Figura 5-43 e na Figura 5-44 são apresentados os resultados as análises de DQO efetuadas com os efluentes das colunas alimentadas com água. Nota-se resultados bastante variados, porém com visível tendência de aumento inicial seguida de um decréscimo dos valores, demonstrando a “lavagem” do solo, ressalta-se que devido a estas colunas se encontrarem saturadas, deve-se considerar que existe um volume de chorume retido no sistema, portanto estas terão tendência a apresentar maior dificuldade de se “limpar”.

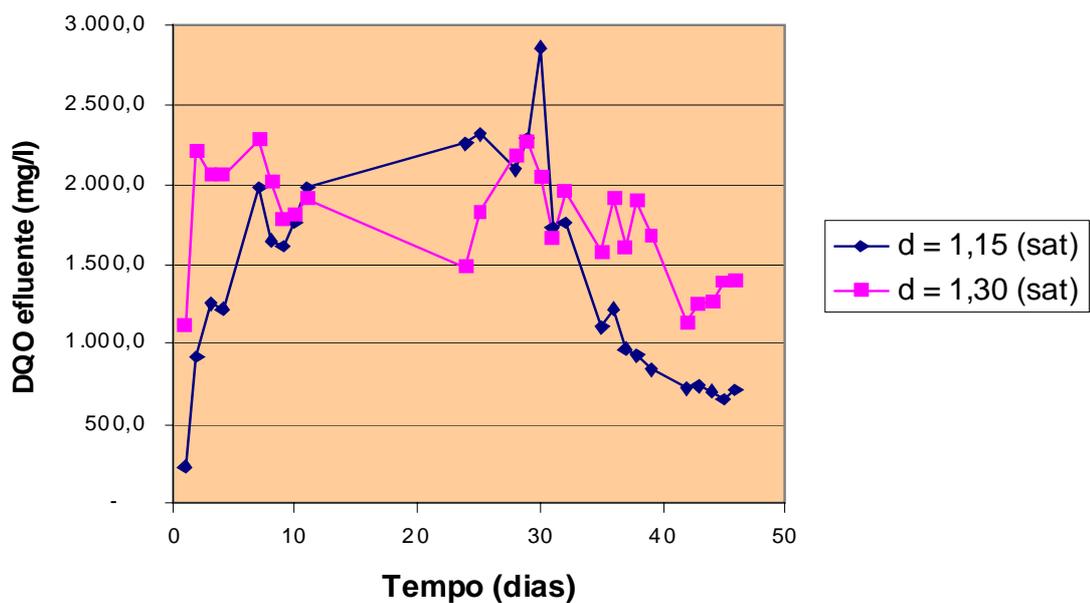


Figura 5-43: DQO efluente, para alimentação diária com água.

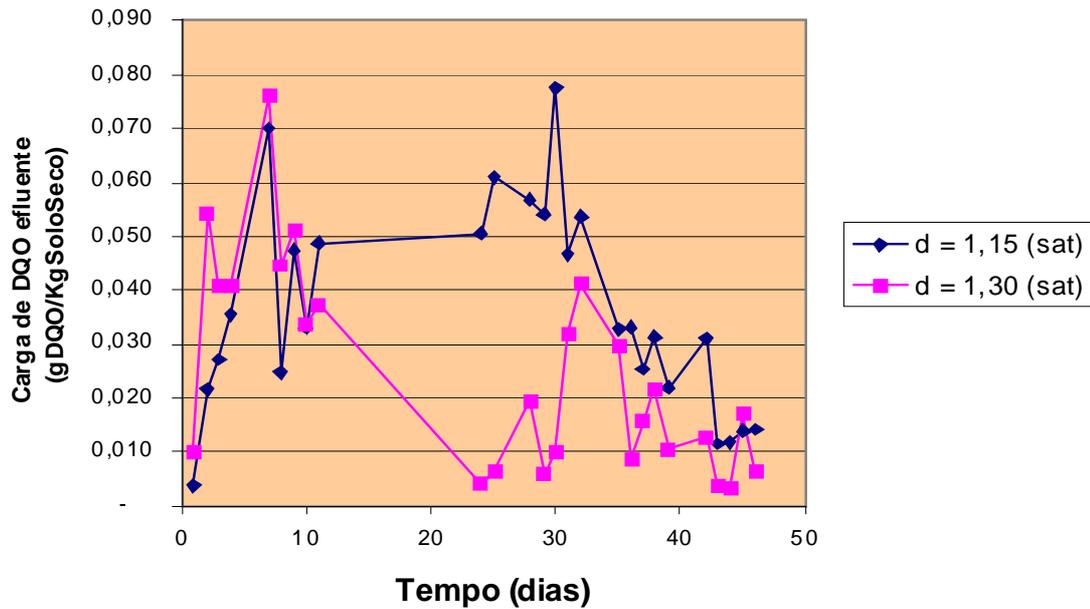


Figura 5-44: Carga de DQO efluente para alimentação diária com água.

Na Figura 5-45 e na Figura 5-46, são apresentados os valores do pH e da Condutividade, respectivamente, do efluente coletado nas colunas em condições saturadas, para o abastecimento com água, considerando-se que o pH médio da água, no período de realização dos ensaios foi igual à 8,26, e a Condutividade igual à 112,3 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Nota-se que não houve grandes variações do pH efluente, porém analogamente aos demais parâmetros, a condutividade apresentou tendência de queda no decorrer do ensaio.

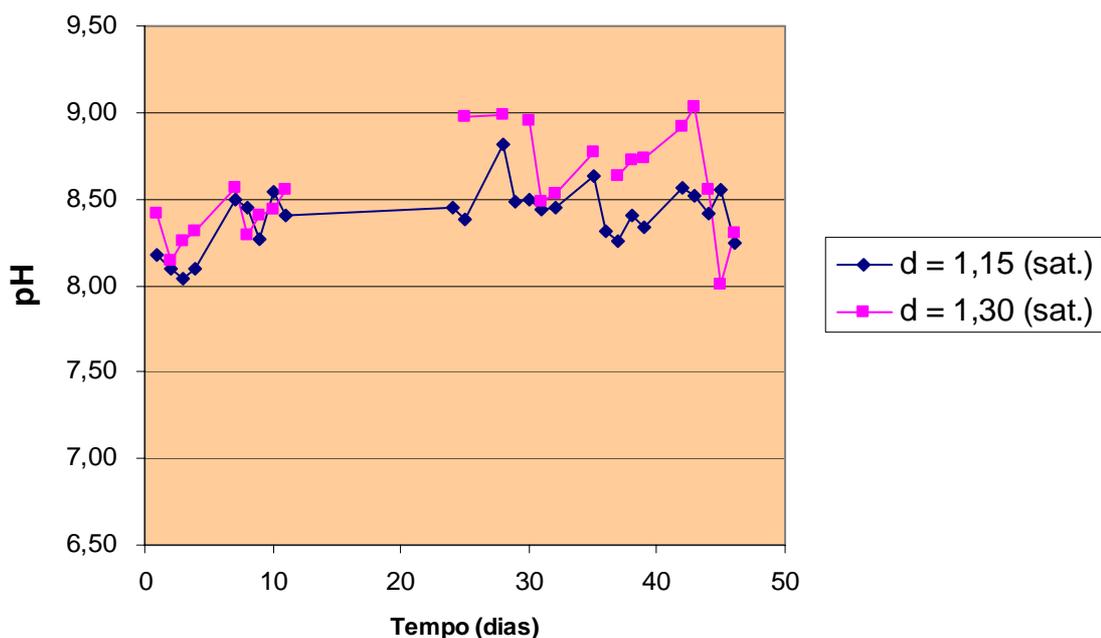


Figura 5-45: Valores do pH para as amostras dos efluentes coletados.

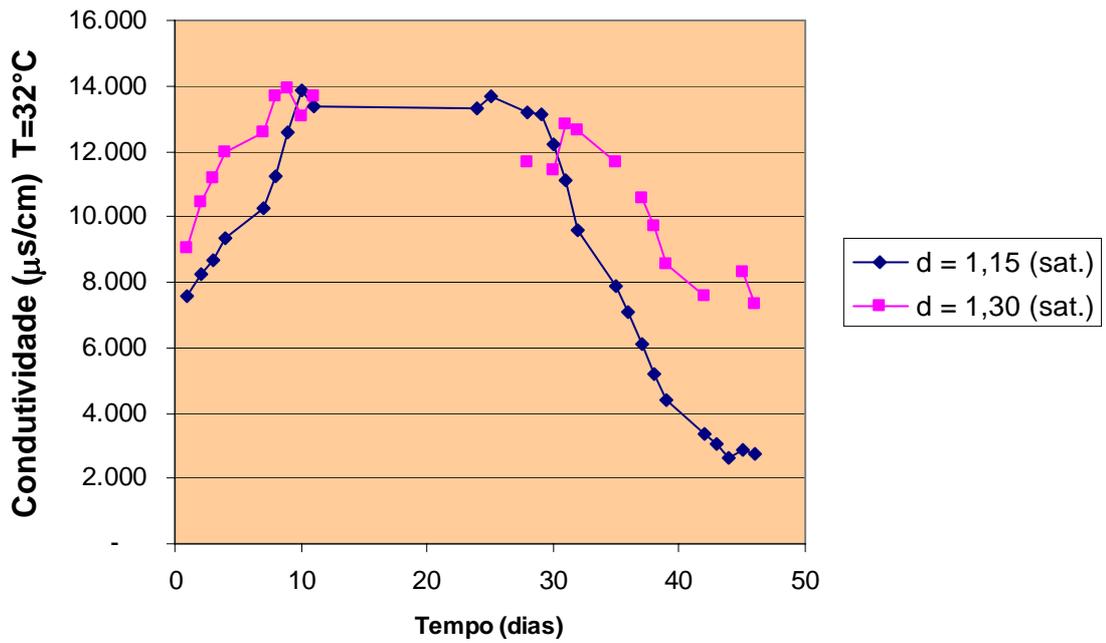


Figura 5-46: Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^\circ\text{C}$, para as amostras coletadas

Na Figura 5-47 e na Figura 5-48, são apresentados os valores de Cor e da Turbidez, respectivamente, do efluente coletado nas colunas em condições saturadas, para o abastecimento com água, sendo observado que para a coluna com densidade de 1,15 houve uma elevação significativa dos valores, no final do ensaio, devido ao arraste de material fino do solo, perceptível pela coloração avermelhada do efluente.

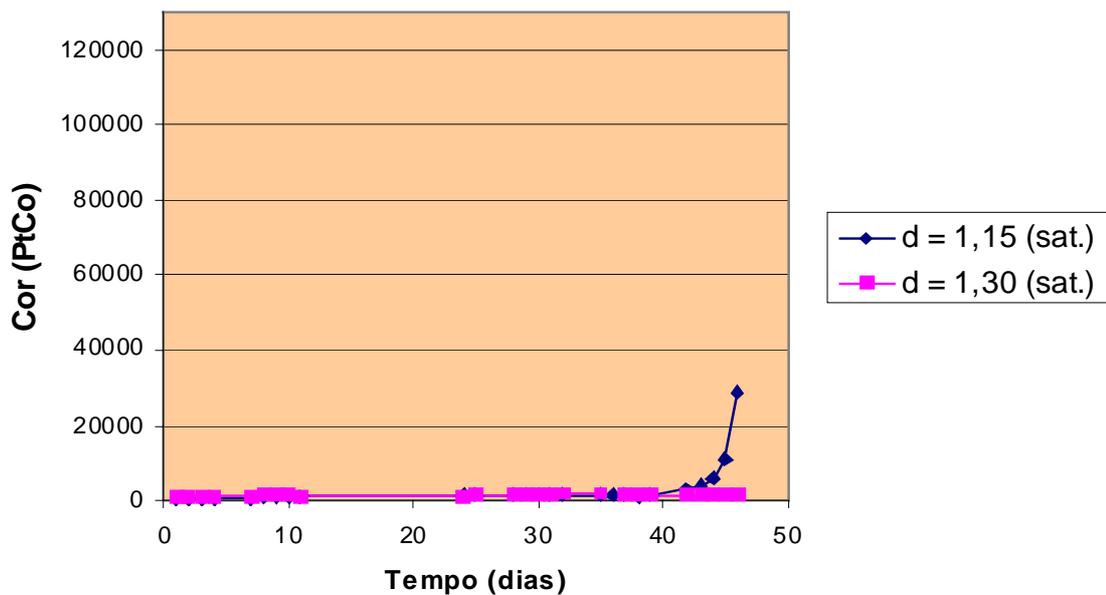


Figura 5-47: Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado nas colunas saturadas (*UC: padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart).

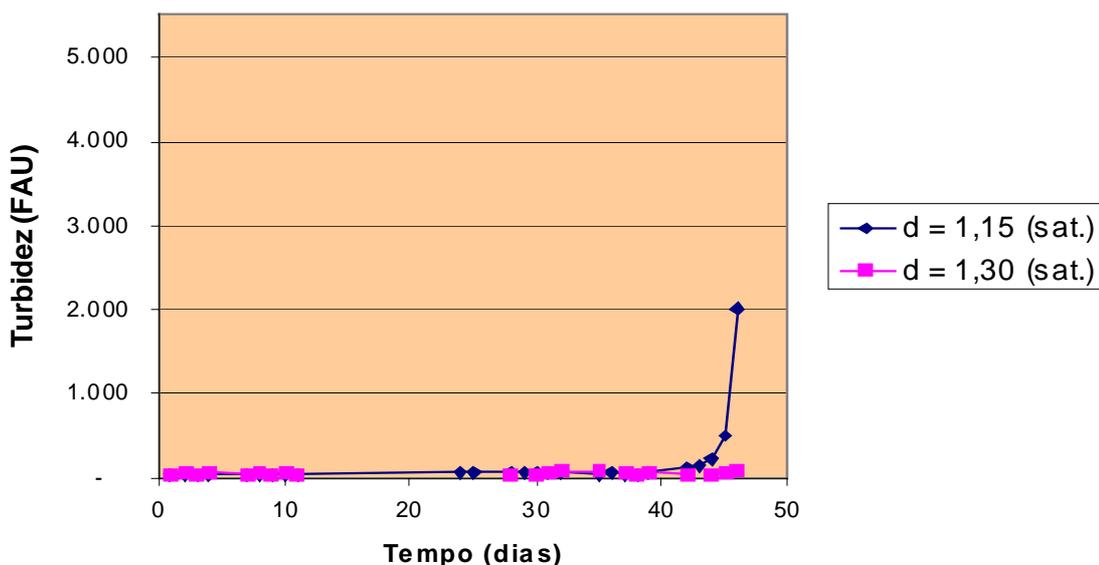


Figura 5-48: Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado das colunas saturadas (*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).

Na Figura 5-49 são apresentados os resultados dos valores de Sólidos Totais do efluente das colunas em condições saturadas abastecidas com água, à qual apresentou no período um valor médio igual à 128,0 mg/l de Sólidos Totais.

Ressalta-se que a concentração de Sólidos Totais do chorume utilizado no abastecimento na primeira etapa desta campanha foi de 9.856 mg/l, portanto mesmo com a lixiviação com água, o efluente das colunas apresentaram concentração de sólidos totais menor que a do chorume.

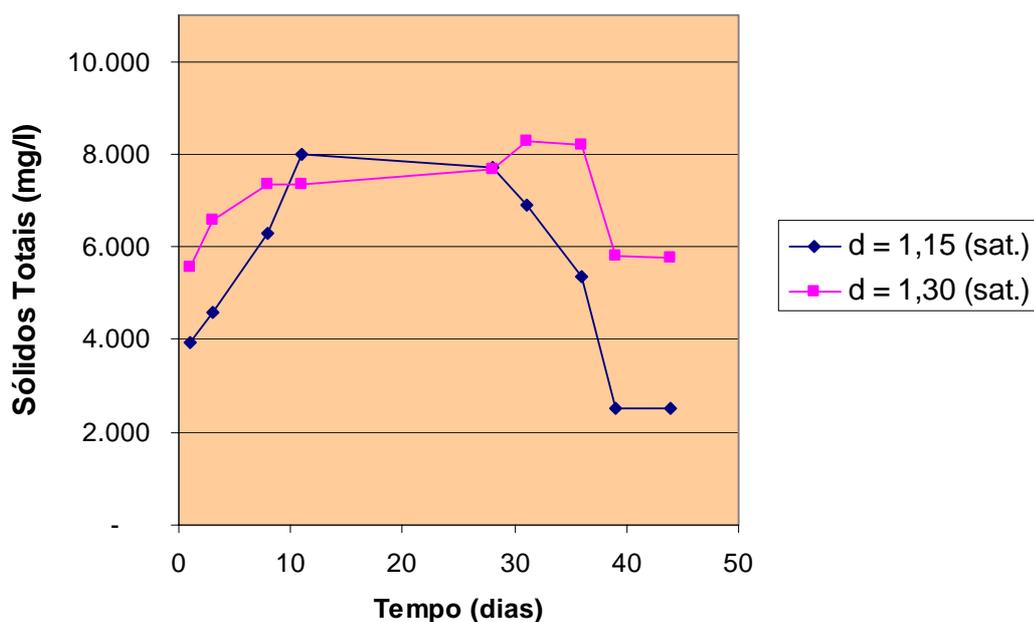


Figura 5-49: Sólidos Totais (mg/l), no efluente das colunas em condições saturadas.

A seguir são apresentados os gráficos relativos aos resultados obtidos para os volumes aplicado e coletado, DQO, pH, Condutividade, Cor, Turbidez e Sólidos Totais, referentes as colunas com densidades de 1,15; 1,30; 1,50 e 1,67, em condições não saturadas.

A partir da Figura 5-50 à Figura 5-53, são apresentadas a relações do volume aplicado e coletado para as colunas em condições não saturadas com densidade de 1,15; 1,30; 1,50 e 1,67 respectivamente, sendo observado que é visível que houve a colmatação da coluna com densidade de 1,67, devido a diferença entre o volume aplicado e coletado, prejudicando a continuidade do ensaio, para esta coluna.

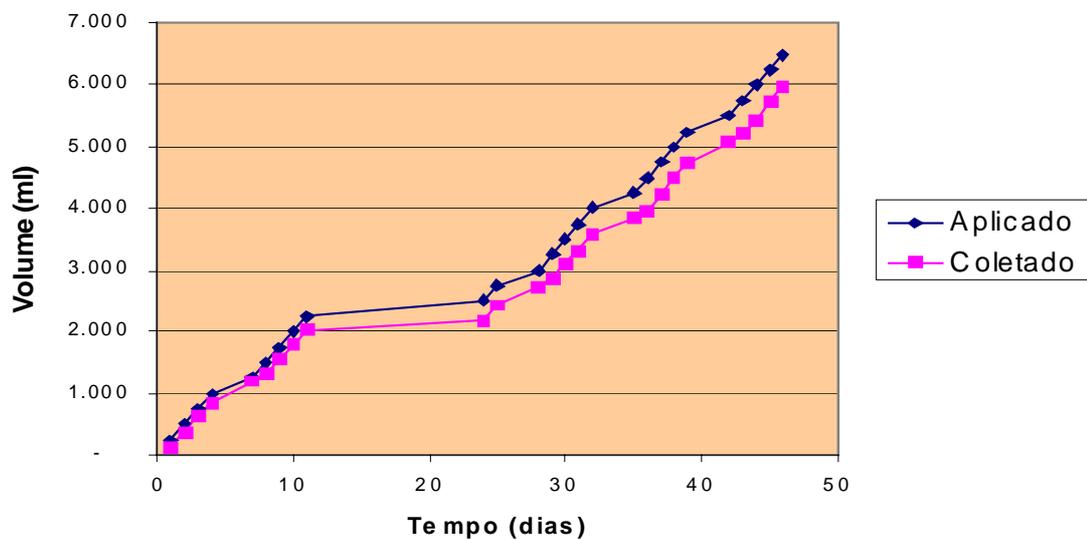


Figura 5-50: Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições não saturadas

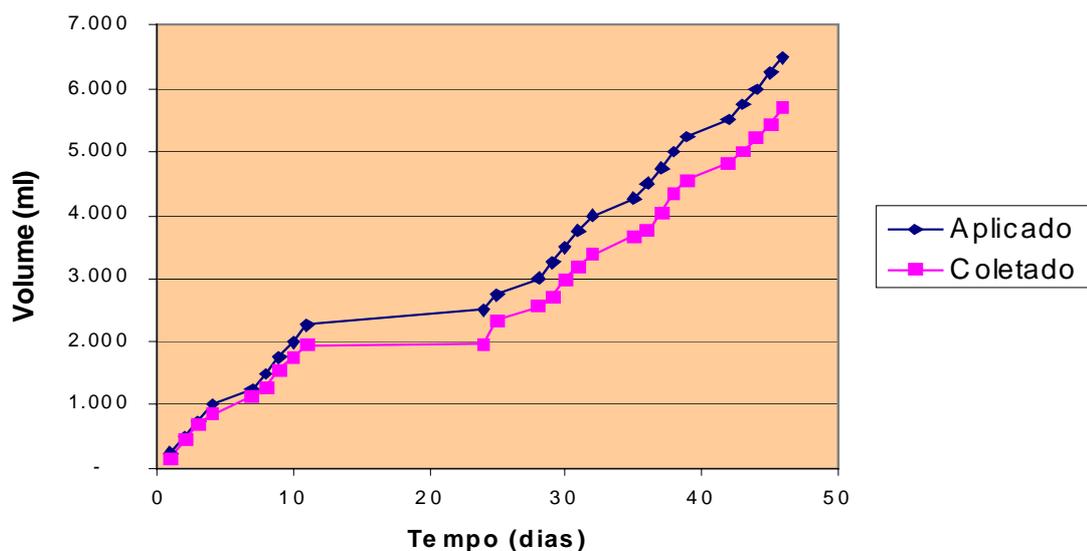


Figura 5-51: Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30, em condições não saturadas

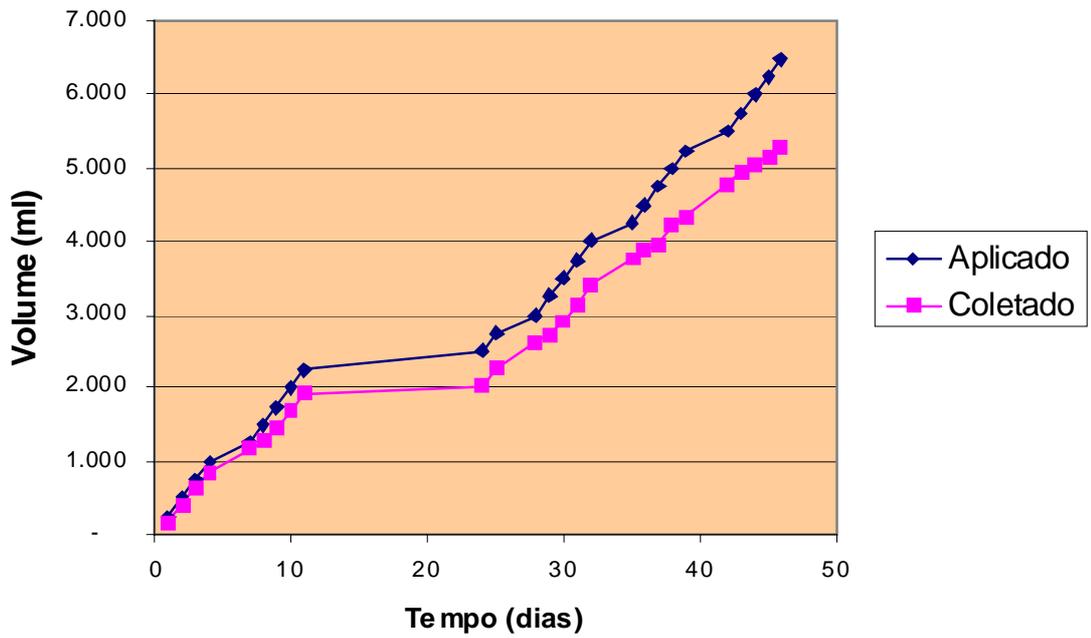


Figura 5-52: Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,50, em condições não saturadas

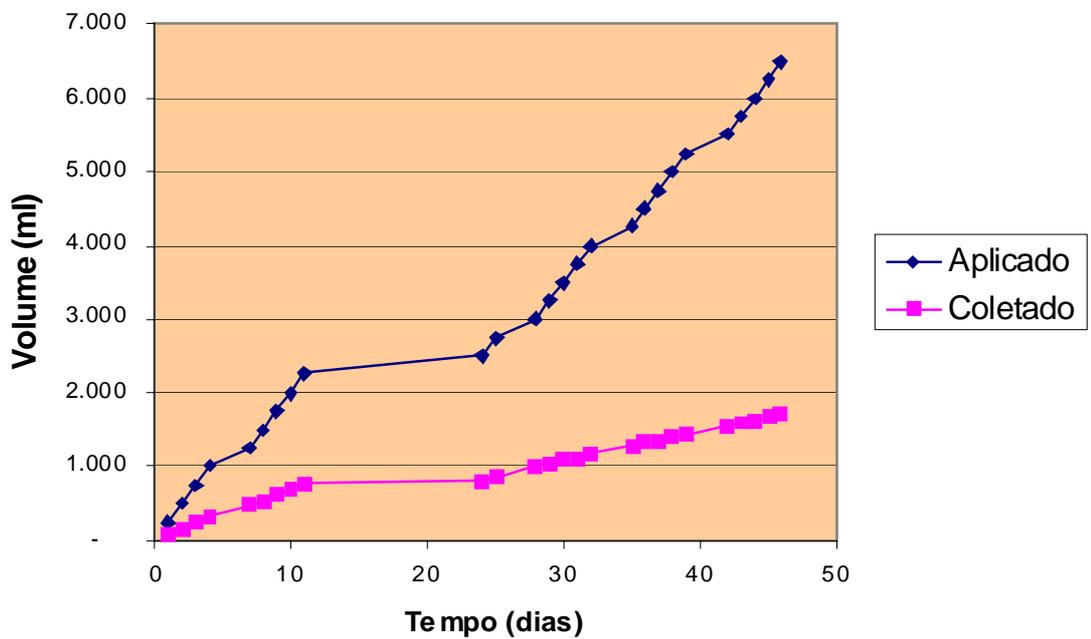


Figura 5-53: Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,67, em condições não saturadas

Na Figura 5-54 e na Figura 5-55 são apresentados os resultados as análises de DQO efetuadas com os efluentes das colunas em condições não saturadas alimentadas com água. Nota-se resultados bastante variados, porém com visível tendência de aumento inicial seguida de um decréscimo dos valores, menos para a coluna com densidade de 1,67, para a qual os valores mantiveram-se altos, devido ao pequeno volume percolado.

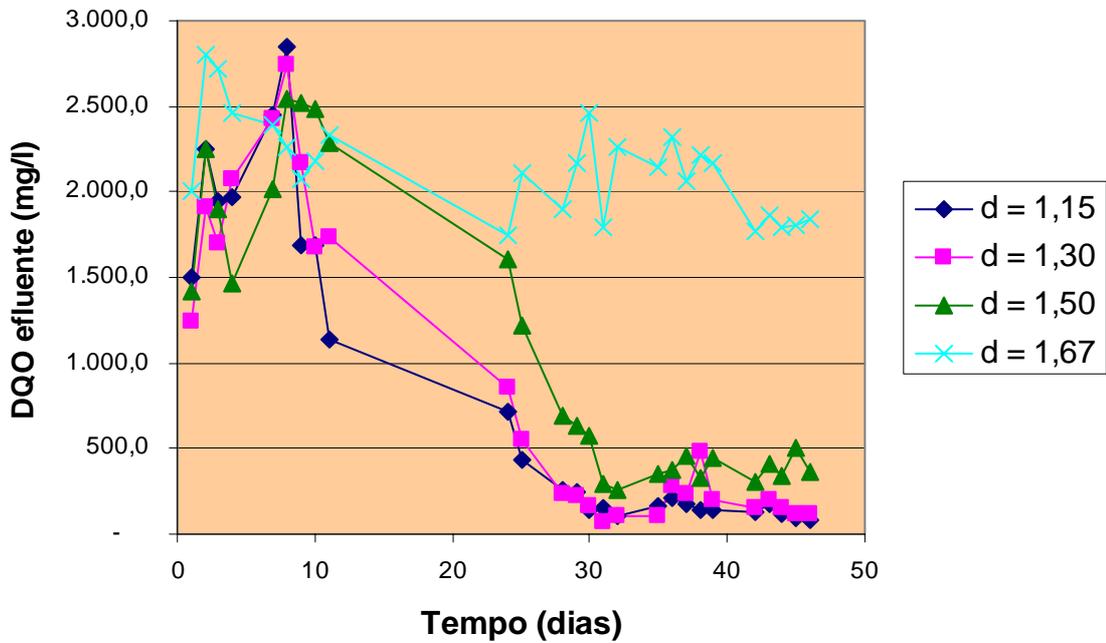


Figura 5-54: DQO efluente, para alimentação diária com água.

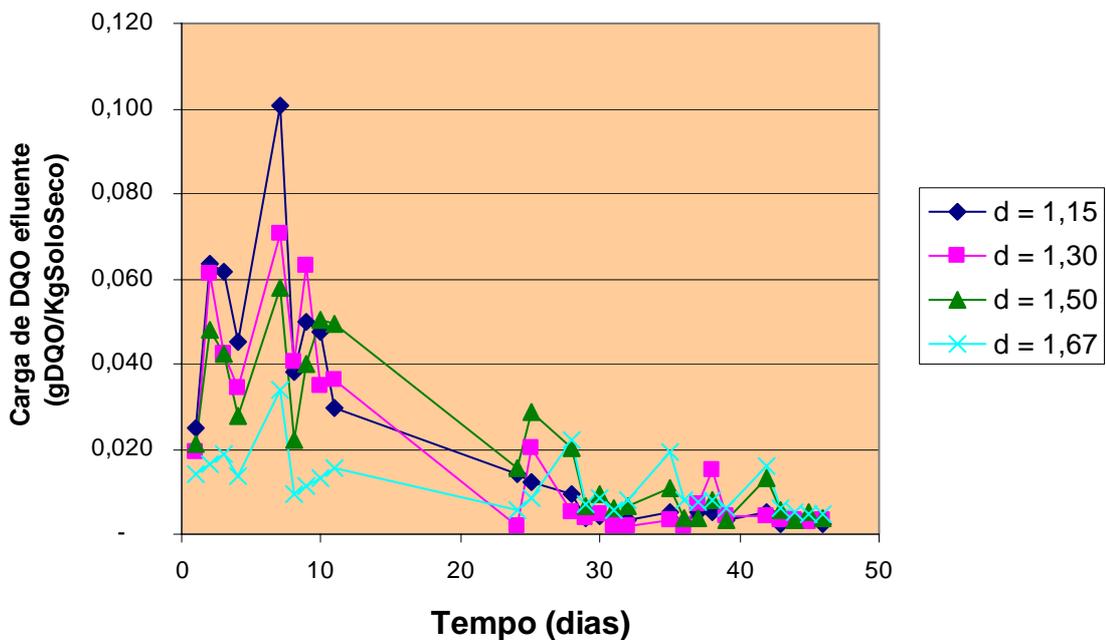


Figura 5-55: Carga de DQO efluente para alimentação diária com água.

Na Figura 5-56 e na Figura 5-57, são apresentados os valores do pH e da Condutividade, respectivamente, do efluente coletado nas colunas em condições não saturadas, para o abastecimento com água, considerando-se que o pH médio da água, no período de realização dos ensaios foi igual à 8,26, e a Condutividade igual à 112,3 $\mu\text{s}/\text{cm}$. . Nota-se que não houve grandes variações do pH efluente, porém analogamente aos demais parâmetros, a condutividade apresentou acentuada tendência de queda no decorrer do ensaio.

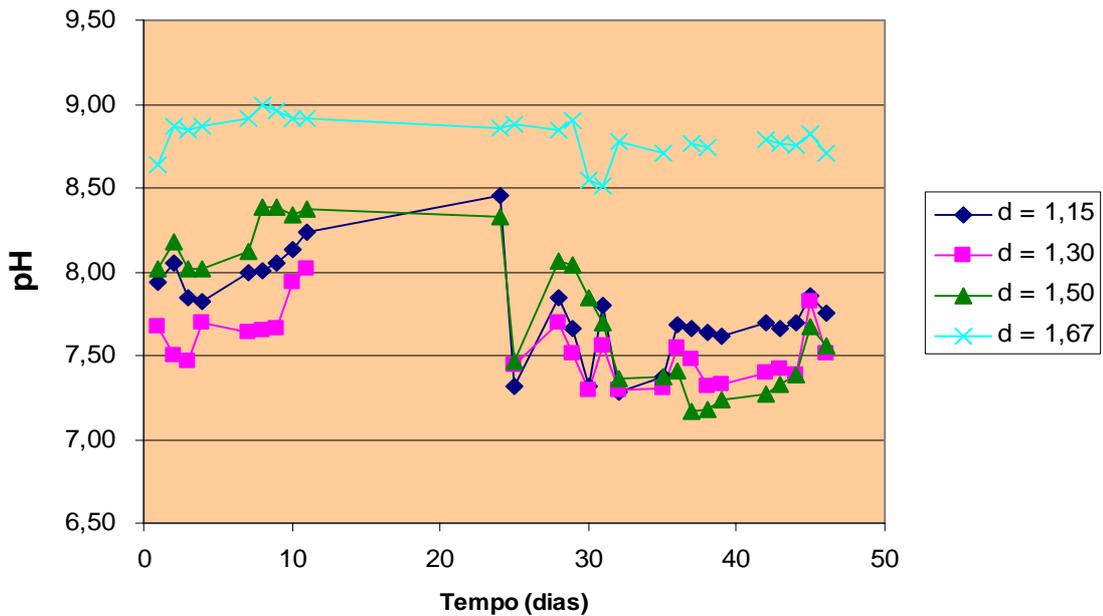


Figura 5-56: Valores do pH para as amostras dos efluentes coletados.

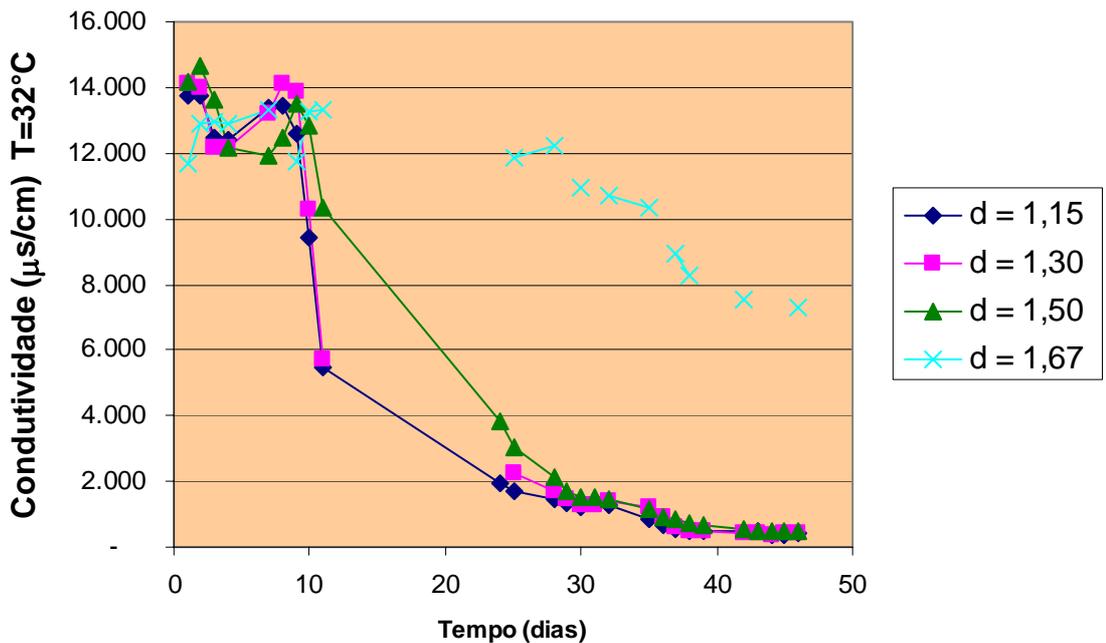


Figura 5-57: Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^\circ\text{C}$, para as amostras coletadas

Na Figura 5-58 e na Figura 5-59, são apresentados os valores de Cor e da Turbidez, respectivamente, do efluente coletado nas colunas em condições não saturadas, para o abastecimento com água, sendo observado que para a coluna com densidade de 1,50 houve uma elevação significativa dos valores, no final do ensaio, devido ao arraste de material fino do solo, perceptível pela coloração avermelhada do efluente.

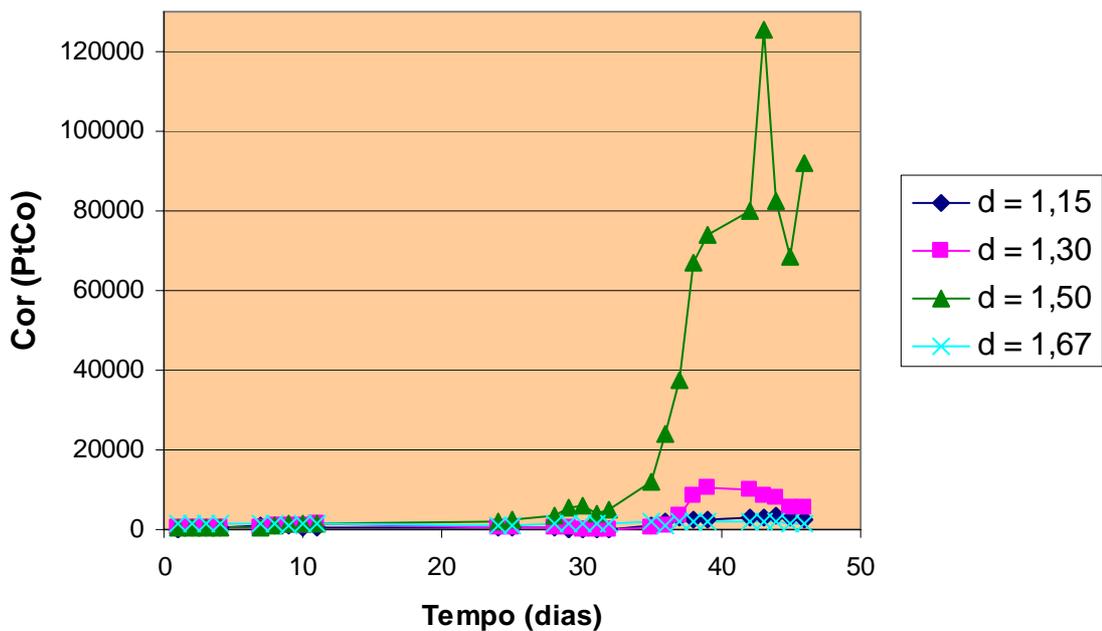


Figura 5-58: Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado nas colunas não saturadas (*UC: padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart).

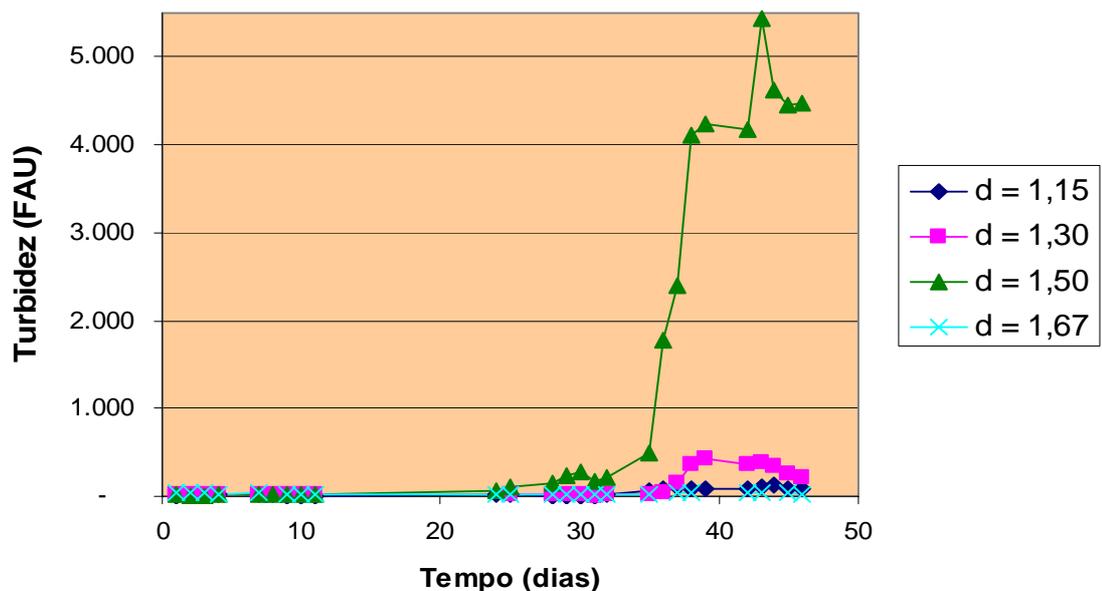


Figura 5-59: Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado das colunas não saturadas (*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).

Na Figura 5-60 são apresentados os resultados dos valores de Sólidos Totais do efluente das colunas em condições não saturadas abastecidas com água, à qual apresentou no período um valor médio igual à 128,0 mg/l de Sólidos Totais. Denota-se a expressiva tendência de queda dos valores para as colunas com densidades de 1,15 e 1,30, porém para a coluna com densidade de 1,50 observa-se o aumento brusco dos valores devido ao arraste de solo, e ainda, para a coluna com densidade 1,67 os valores mantiveram-se altos devido ao pequeno volume percolado.

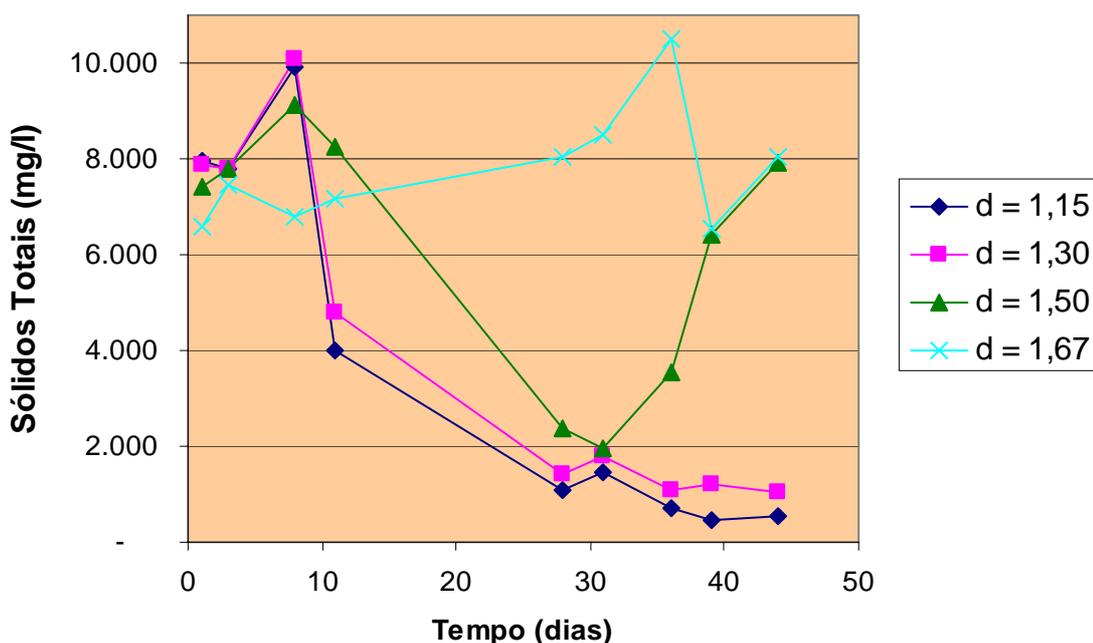


Figura 5-60: Sólidos Totais (mg/l), no efluente das colunas em condições não saturadas.

Terceira Etapa

Esta terceira etapa da segunda campanha de ensaios ocorreu no período de 12/03/2004 à 04/04/2004, quando efetuou-se o abastecimento por 18 (dezoito) em 24 dias, novamente com chorume, salientando-se que devido a colmatção acarretando na diminuição da permeabilidade e prejudicando o andamento normal do ensaio, foram desconsideradas as colunas preenchidas com solo com densidade de 1,30 em condições saturadas e com densidade de 1,67 em condições não saturadas.

Destaca-se que esta etapa foi uma seqüência da campanha, portanto as características das colunas de percolação, foram iguais à da primeira campanha de ensaios, as quais encontram-se especificadas na Tabela 5-1.

Utilizou-se nos cálculos da eficiência e da carga removida, a DQO média do chorume, ou seja, 2.037,5 mg/l, obtida com a realização de ensaios periódicos durante toda a campanha.

Para as análises preliminares do afluente (chorume) utilizado no abastecimento das colunas nesta terceira etapa da segunda campanha de ensaios, obteve-se o valor de pH igual 7,98; Condutividade igual à 12.260 $\mu\text{s}/\text{cm}$; Valor de Cor 3.500 PtCo; Turbidez de 216 FAU e a média do valor de Sólidos Totais no período foi igual à 7.391 mg/l.

Para a melhor visualização os resultados são apresentados nos gráfico à seguir, separadamente para as colunas em condições saturadas e não saturadas, sendo primeiramente mostrado os gráficos referentes a coluna com densidade de 1,15 saturada. Em anexo são apresentadas as tabelas contemplando todos os resultados obtidos.

Na Figura 5-61, onde é apresentada a relação do volume aplicado e do volume coletado em função do tempo, pode-se notar que mesmo para esta coluna com densidade de 1,15, houve a colmatação do material dificultando o escoamento, resultando em baixos volumes efluentes, mesmo com o acúmulo de afluente na parte superior da coluna, acarretando em aumento da carga hidráulica.

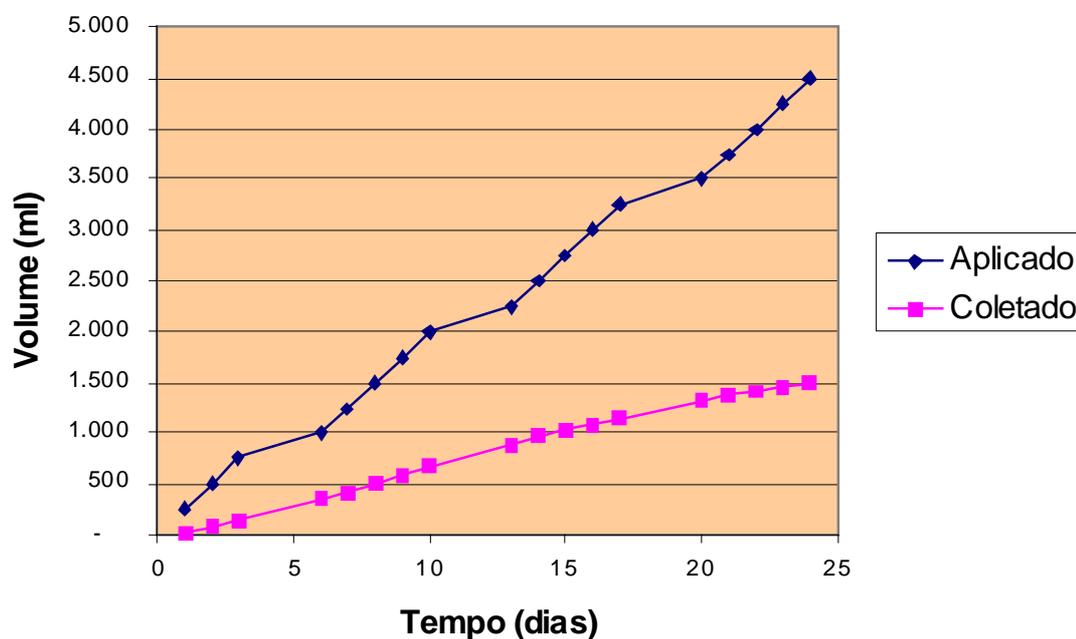


Figura 5-61: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições saturadas.

Na Figura 5-62 à Figura 5-64 são apresentados os resultados as análises de DQO efetuadas com os efluentes da coluna em condições saturadas, alimentada com chorume, nesta terceira etapa da campanha.

Observa-se que a eficiência manteve-se estável durante toda esta etapa, porém a carga removida apresentou variações devido aos volumes coletados após os finais de semana, que eram relativamente maiores.

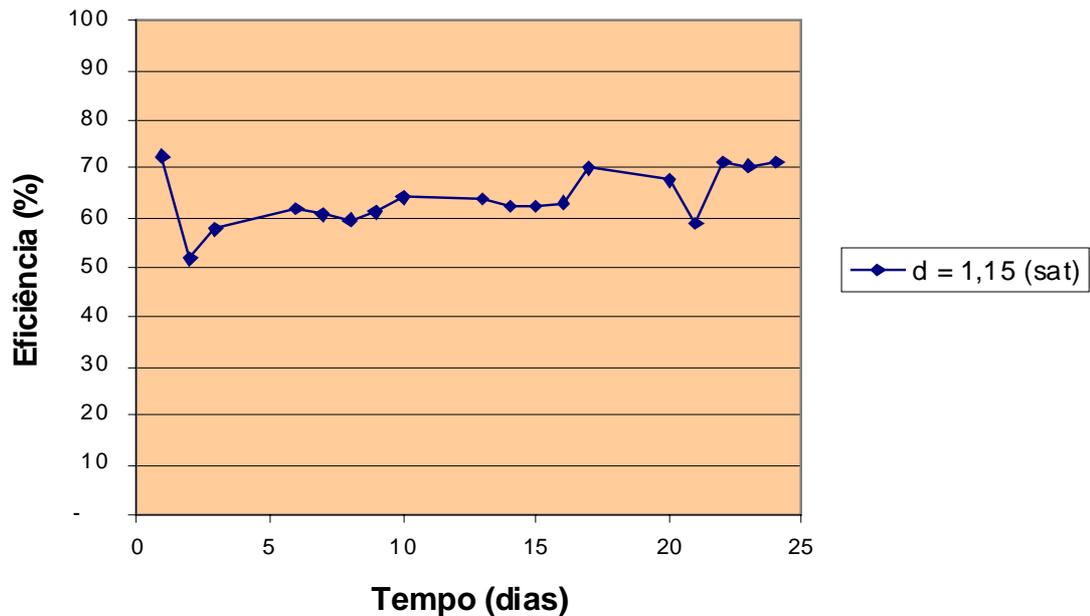


Figura 5-62: Eficiência de remoção de DQO para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de 0,034 m³chorume/m³SoloSeco

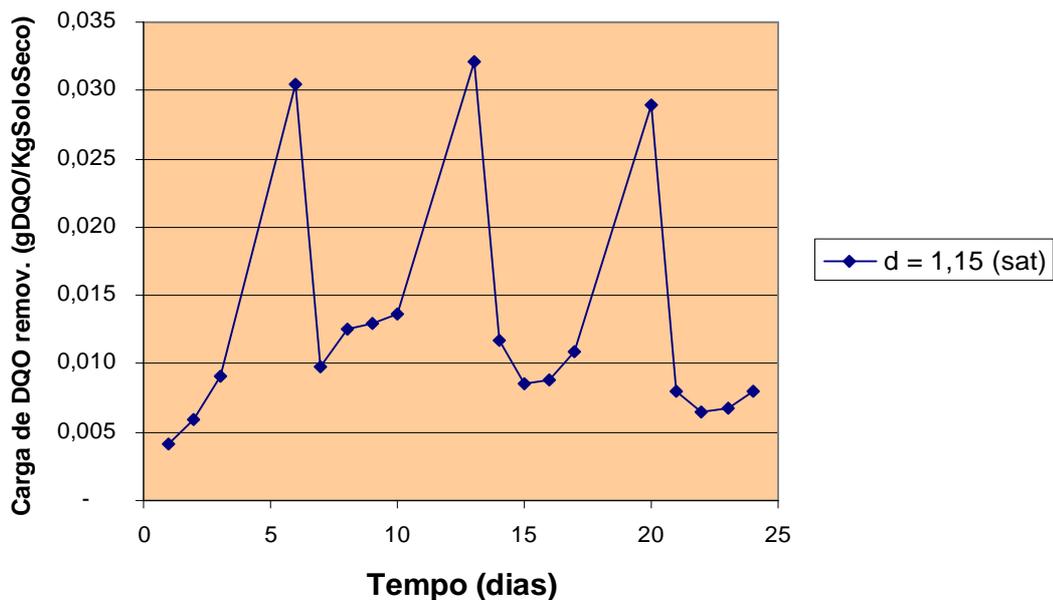


Figura 5-63: Carga de DQO removida para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de 0,034 m³chorume/m³SoloSeco

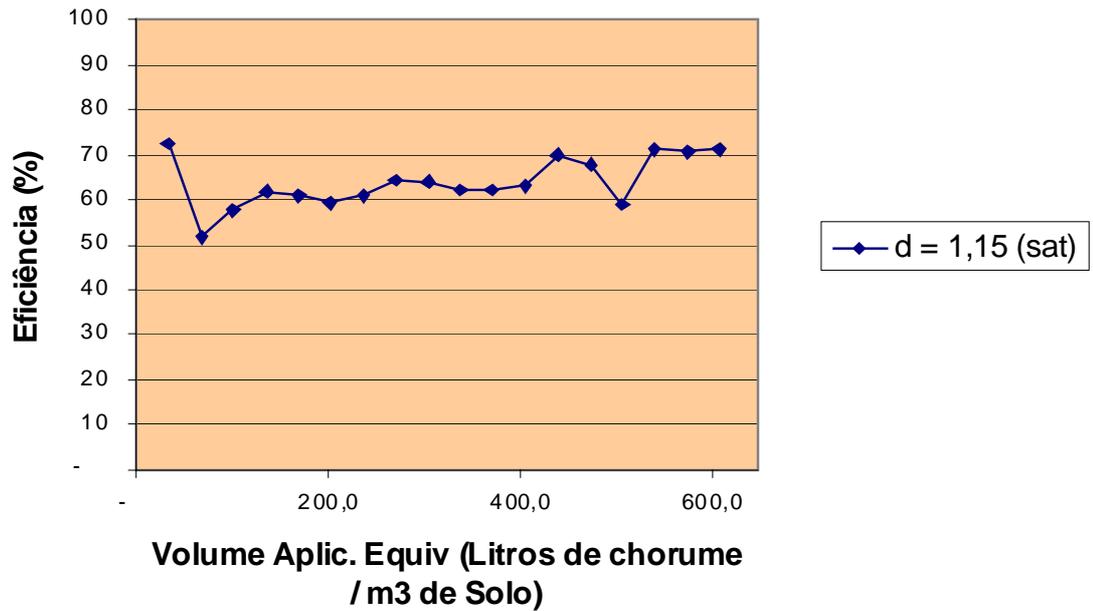


Figura 5-64: Eficiência de remoção de DQO em função do volume aplicado por metro cúbico de solo seco.

Na Figura 5-65 e na Figura 5-66, são apresentados os valores do pH e da Condutividade, respectivamente, do efluente coletado na coluna em condições saturadas, para o abastecimento com chorume, considerando-se que o pH do chorume, foi igual à 7,98; e a Condutividade igual à 12.260 $\mu\text{s}/\text{cm}$, ambos obtidos em análises preliminares do afluente. Observa-se um valor inicial de pH discrepante, porém mantendo-se estável durante o restante da campanha. Para a condutividade nota-se uma pequena tendência de queda ao longo do ensaio.

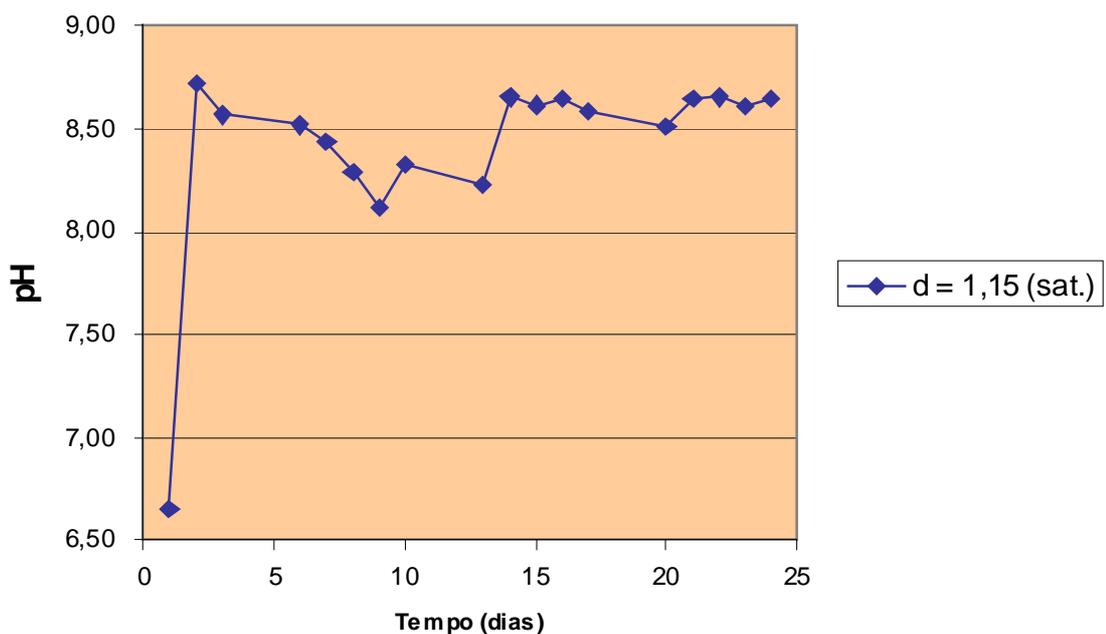


Figura 5-65: Valores do pH para as amostras dos efluentes coletados.

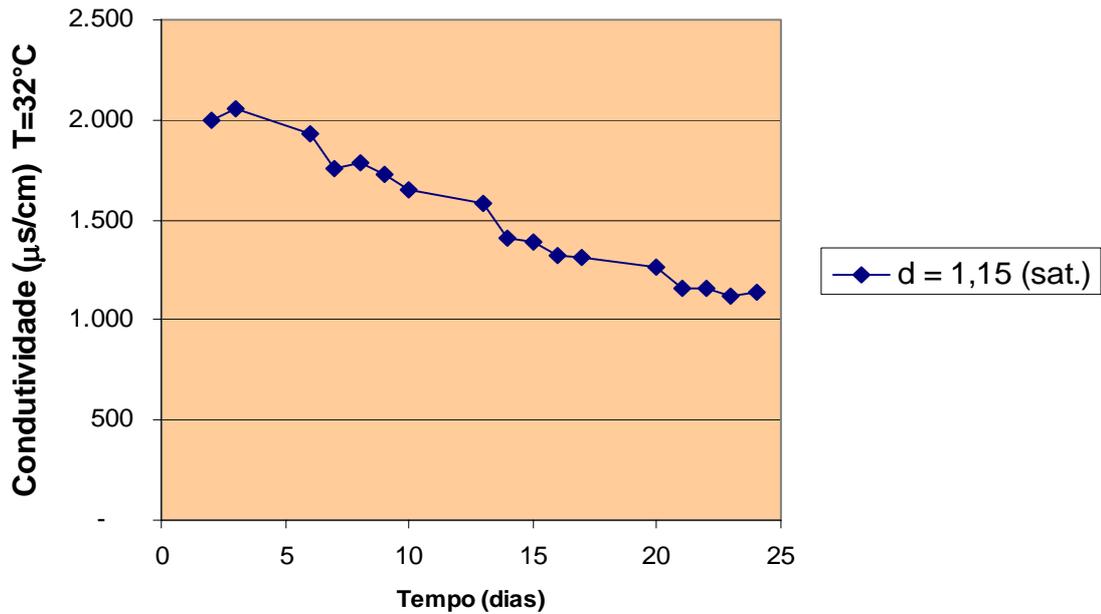


Figura 5-66: Valores da Condutividade ($\mu\text{s/cm}$) $T=32^\circ\text{C}$, para as amostras coletadas

Na Figura 5-67 e na Figura 5-68 são apresentados os valores de Cor e da Turbidez, respectivamente, do efluente coletado na coluna em condições saturadas, para o abastecimento com chorume, considerando-se que o valor da Cor do chorume, foi igual à 3.500 PtCo; e da Turbidez, igual à 216 FAU, ambos obtidos em análises preliminares do afluente.

Observa-se um incremento significativo de cor e turbidez no efluente coletado, comparando-se com a cor e a turbidez inicial do afluente, o que pode ter ocorrido em função do arraste de finos do solo.

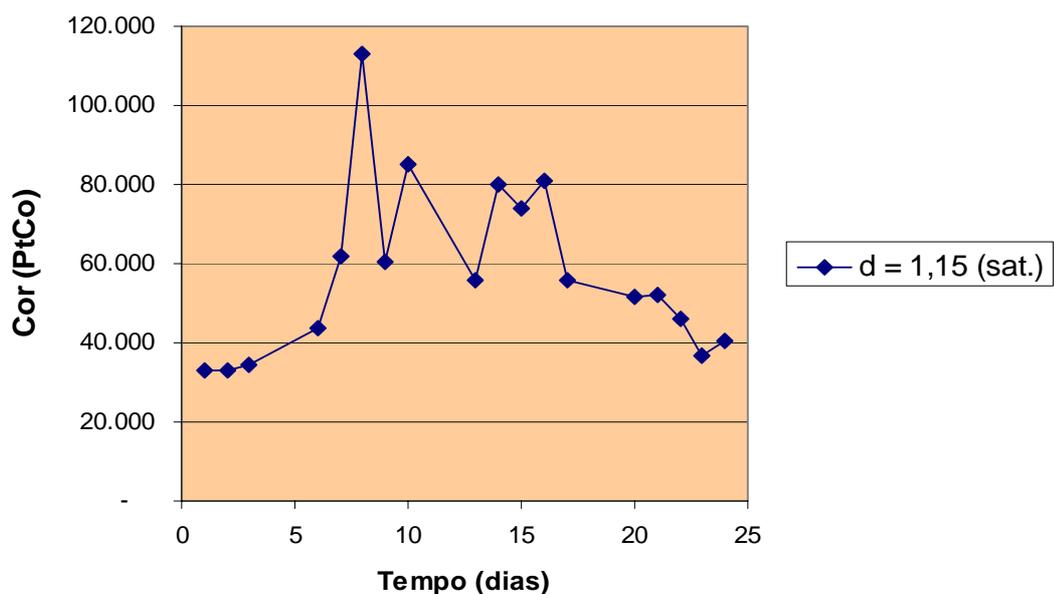


Figura 5-67: Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado na coluna saturada (*UC: padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart).

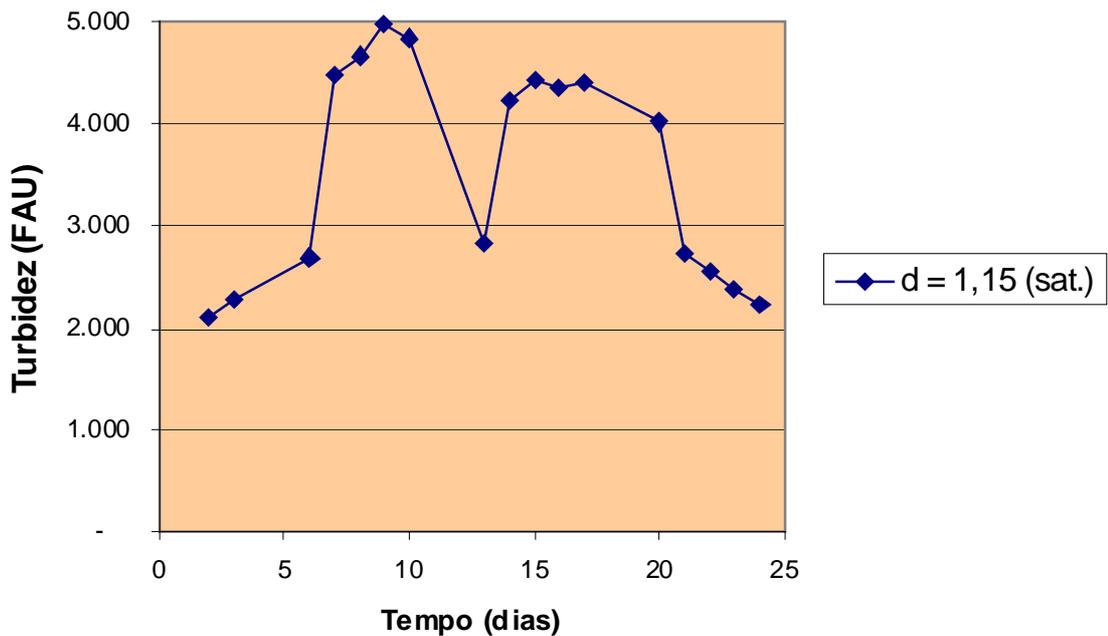


Figura 5-68: Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado da coluna saturada (*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).

Na Figura 5-69 são apresentados os resultados dos valores de Sólidos Totais do efluente da coluna em condições saturadas abastecida com chorume, o qual apresentou um valor médio igual à 7.391 mg/l de Sólidos Totais. Observa-se que houve um arraste de material provocado pela percolação do chorume, justificando assim os acréscimos de Cor e Turbidez, comentados anteriormente.

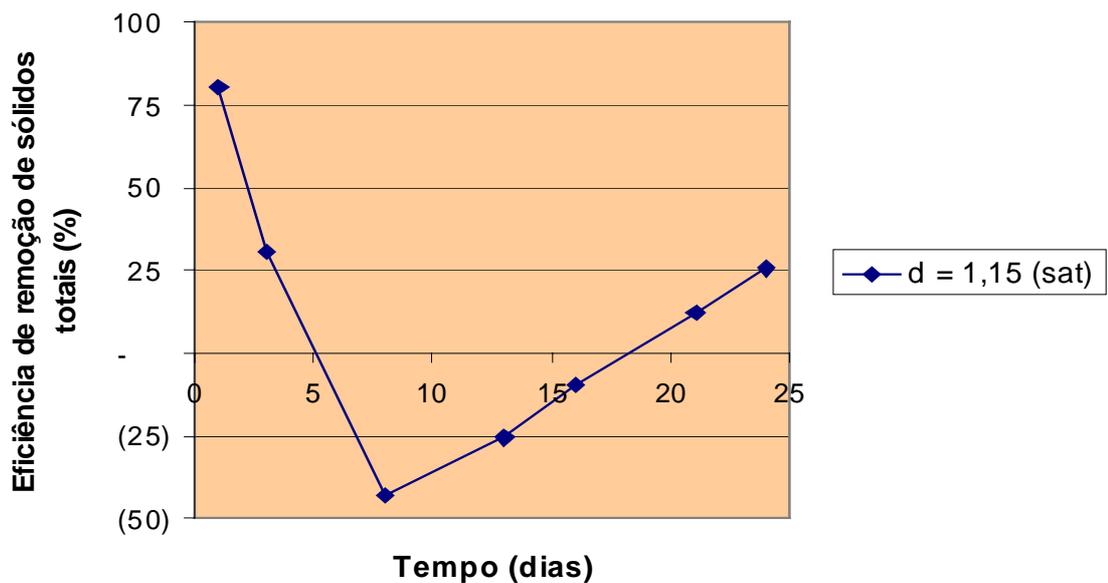


Figura 5-69: Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l), no efluente da coluna em condições saturadas.

A seguir são apresentados os gráficos relativos aos resultados obtidos para os volumes aplicado e coletado, DQO, pH, Condutividade, Cor, Turbidez e Sólidos Totais, referentes as colunas com densidades de 1,15; 1,30 e 1,50, em condições não saturadas.

A partir da Figura 5-70 à Figura 5-72 são apresentadas a relações do volume aplicado e coletado para as colunas em condições não saturadas com densidade de 1,15; 1,30 e 1,50 respectivamente, sendo observado que é visível que houve a colmatação da coluna com densidade de 1,50, devido a diferença entre o volume aplicado e coletado, prejudicando a continuidade do ensaio.

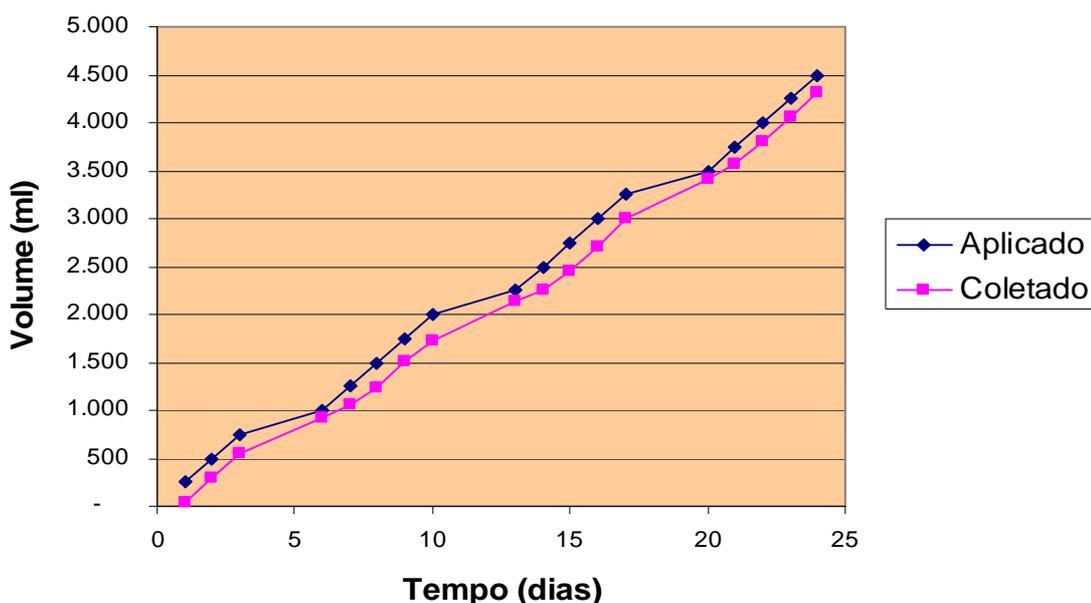


Figura 5-70: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15, em condições não saturadas

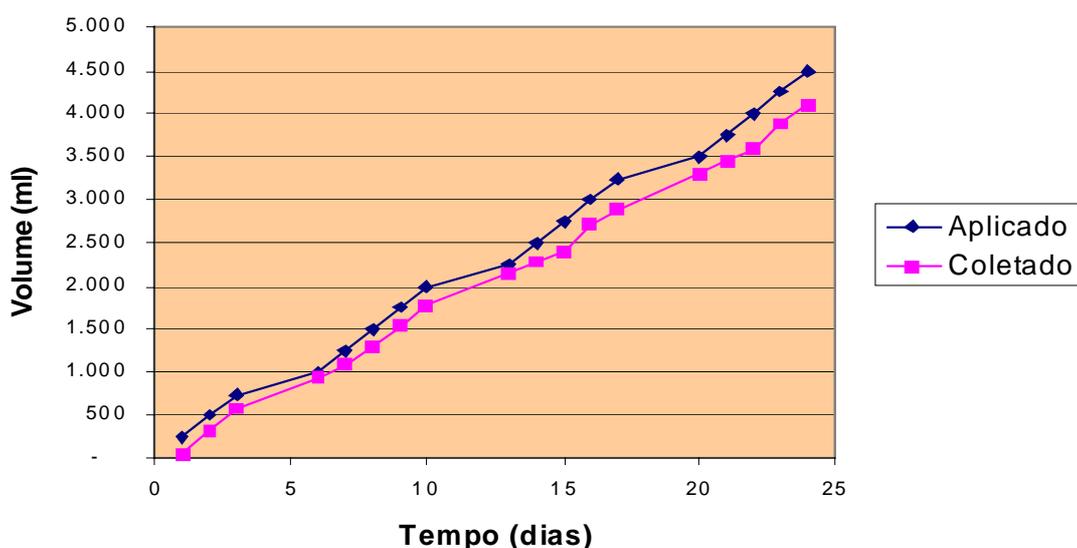


Figura 5-71: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30, em condições não saturadas

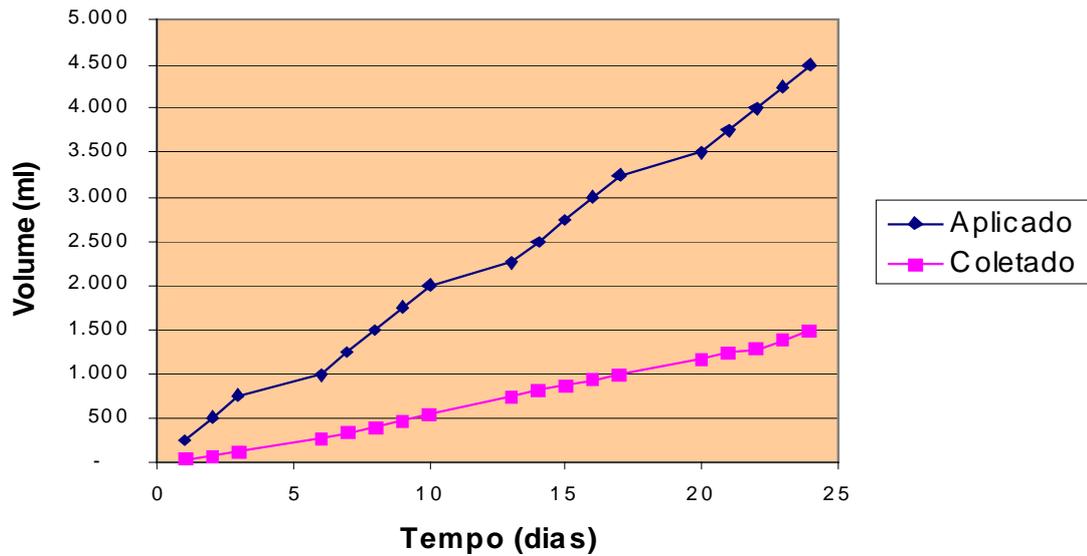


Figura 5-72: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,50, em condições não saturadas

Na Figura 5-73 à Figura 5-75 são apresentados os resultados as análises de DQO efetuadas com os efluentes da coluna em condições saturadas, alimentada com chorume, nesta terceira etapa da campanha.

Observa-se que após a “lavagem” das colunas com água, durante a segunda etapa desta campanha, o sistema recuperou a eficiência, promovendo novamente remoções acima de 90%, e apresentando queda brusca após a saturação, o que não ocorreu para a coluna com densidade de 1,50 devido ao baixo escoamento.

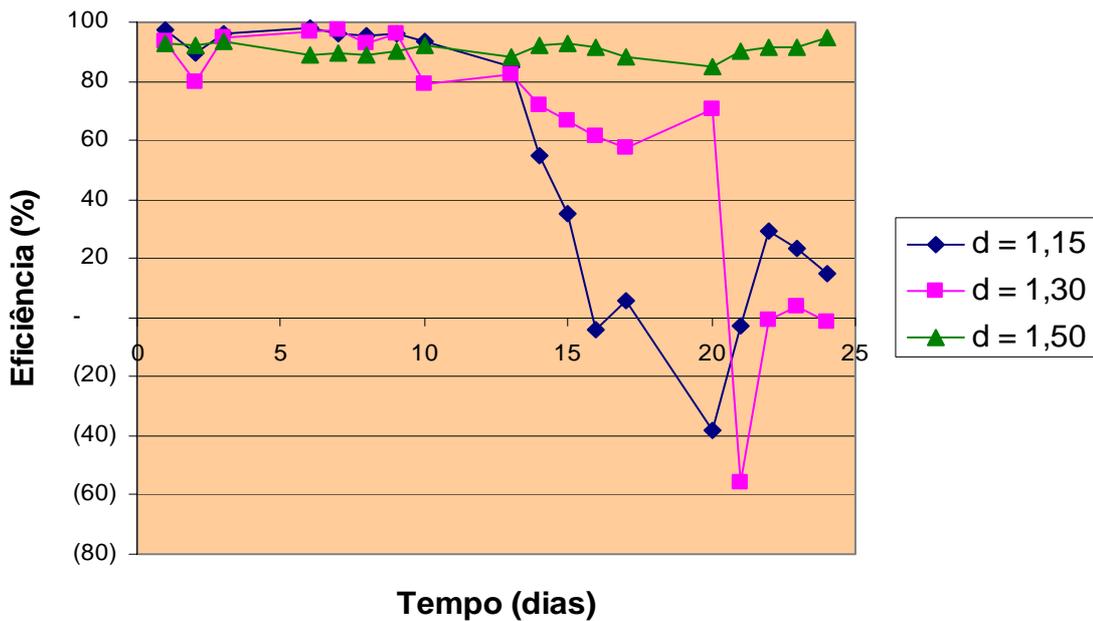


Figura 5-73: Eficiência de remoção de DQO para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3 \text{ chorume} / \text{m}^3 \text{ SoloSeco}$

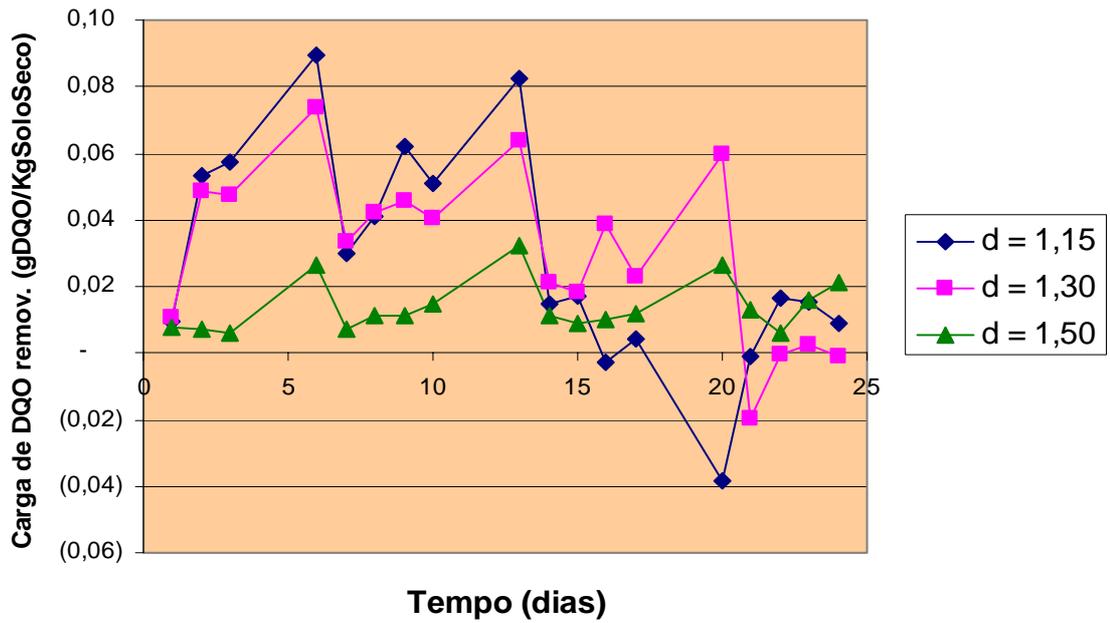


Figura 5-74: Carga de DQO removida para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3 \text{ chorume} / \text{m}^3 \text{ SoloSeco}$

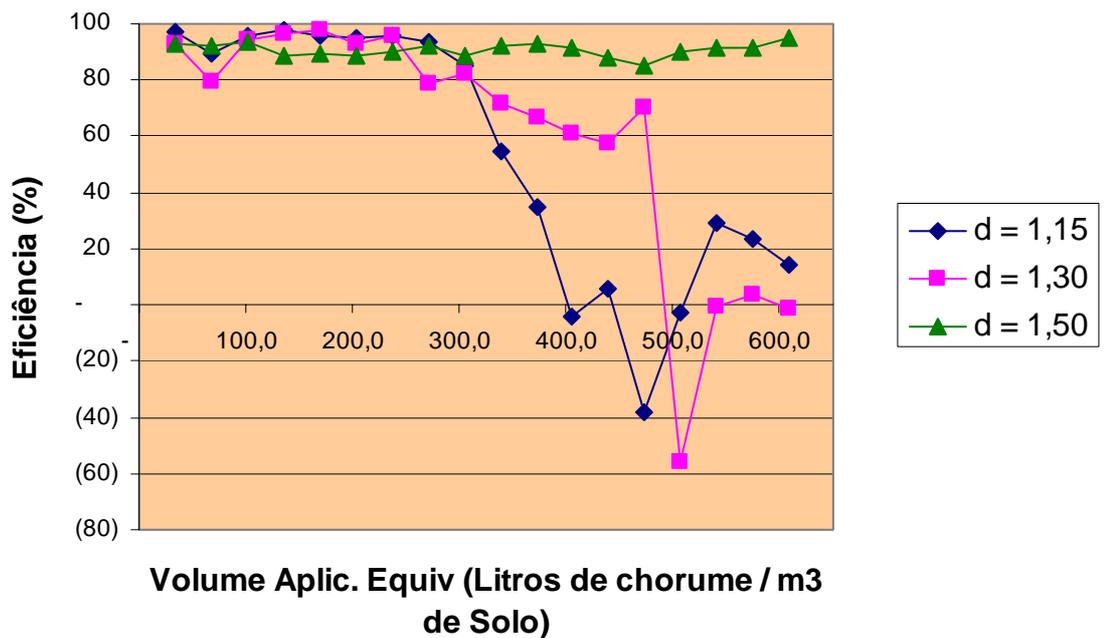


Figura 5-75: Eficiência de remoção de DQO em função do volume aplicado por metro cúbico de solo seco.

Na Figura 5-76 e na Figura 5-77, são apresentados os valores do pH e da Condutividade, respectivamente, do efluente coletado nas colunas em condições não saturadas, para o abastecimento com chorume, considerando-se que o pH do chorume, foi igual à 7,98; e a Condutividade igual à $12.260 \mu\text{s}/\text{cm}$, ambos obtidos em análises preliminares do afluente. Observa-se valores de pH bastante variáveis.

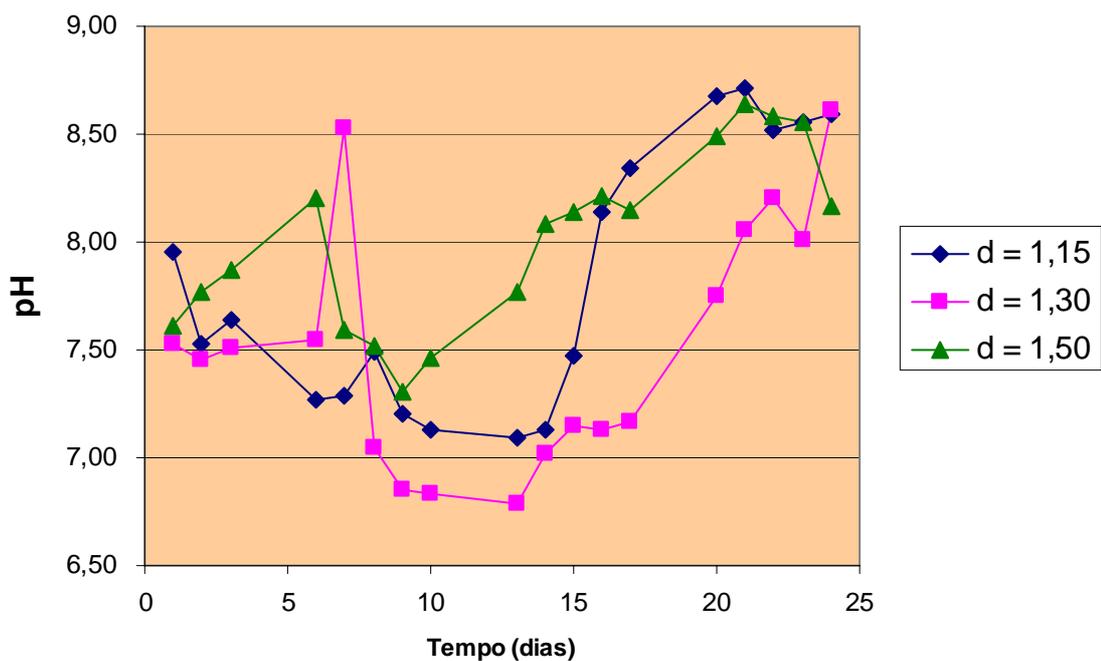


Figura 5-76: Valores do pH para as amostras dos efluentes coletados.

Na Figura 5-77, que os valores de condutividade tendem a aumentar quando da diminuição da eficiência do sistema, devido ao acréscimo de contaminantes no efluente, o que não ocorreu somente para a coluna com densidade de 1,50 devido a colmatação e diminuição do escoamento da mesma, prejudicando o ensaio.

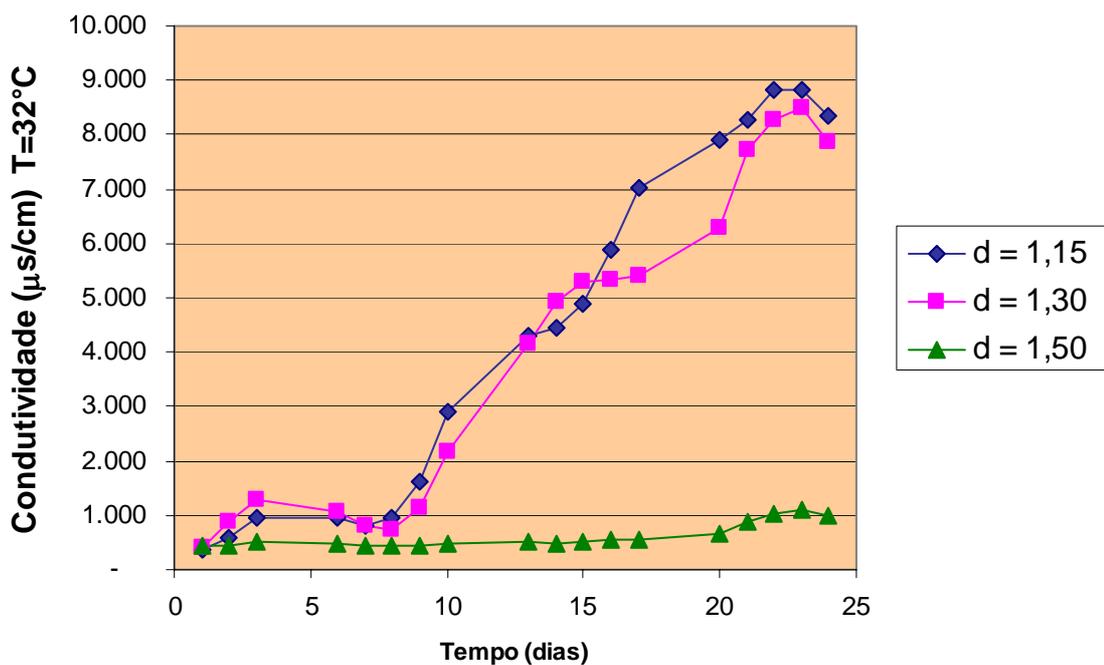


Figura 5-77: Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^\circ\text{C}$, para as amostras coletadas

Na Figura 5-78 e na Figura 5-79 são apresentados os valores de Cor e da Turbidez, respectivamente, do efluente coletado nas colunas em condições não saturadas, para o abastecimento com chorume, considerando-se que o valor da Cor do chorume, foi igual à 3.500 PtCo; e da Turbidez, igual à 216 FAU, ambos obtidos em análises preliminares do afluente.

Para os valores de Cor e Turbidez das colunas com densidades de 1,15 e 1,30, um valor inicial alto, devido a tendência observada na etapa anterior de arraste de solo, porém logo houve a estabilização dos valores, apresentado novo acréscimo ao final do ensaio, devido a diminuição da eficiência do sistema. Para a coluna com densidade de 1,50 observa-se valores anômalos, devido ao grande arraste de material promovido na etapa anterior e ao baixo escoamento, apresentando assim grande tendência de queda.

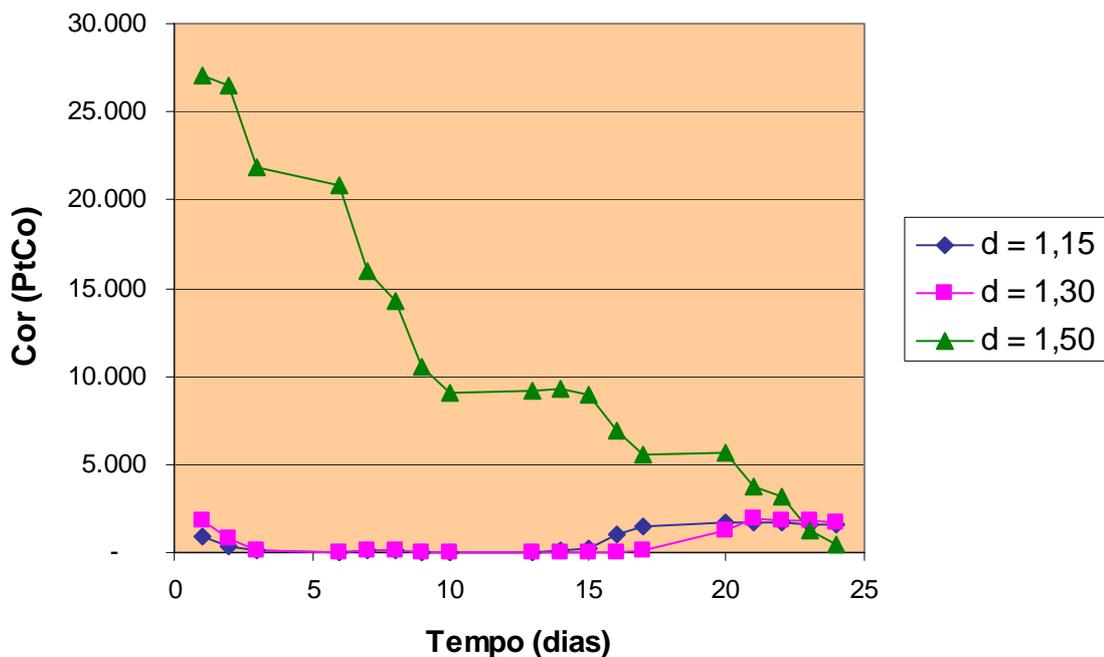


Figura 5-78: Valores de Cor (UC*) para o efluente coletado nas colunas não saturadas (*UC: padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart).

Ressalta-se que o arraste de material fino do solo foi observado com maior relevância durante o abastecimento com água, sendo que abastecendo-se novamente com chorume, observa-se que a diminuição significativa desta ocorrência.

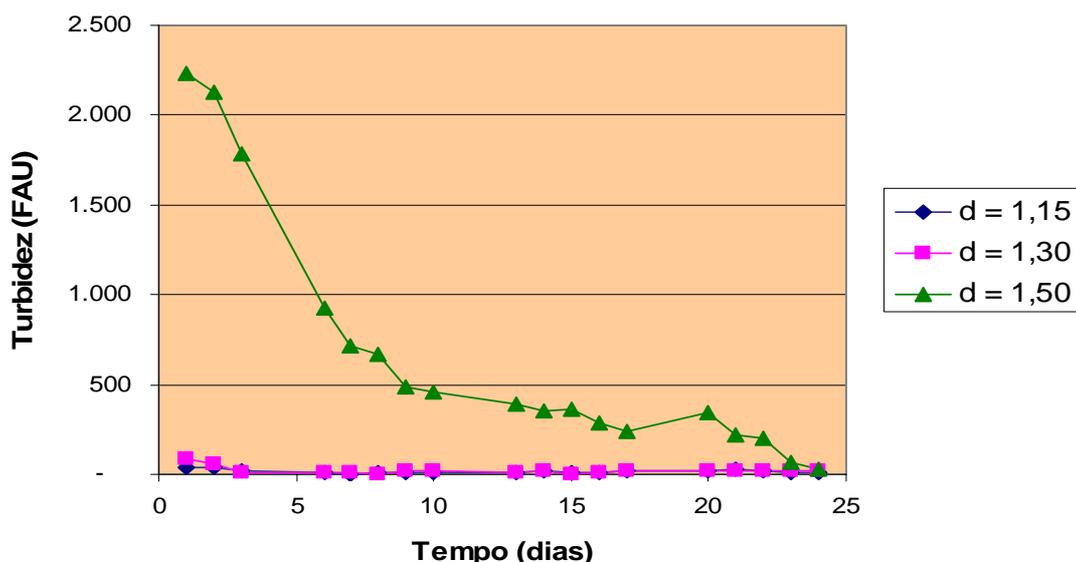


Figura 5-79: Valores da Turbidez (UT*) para o efluente coletado das colunas não saturadas (*UT: unidade FAU - Formazin Attenuation Units).

Na Figura 5-80 são apresentados os resultados dos valores de Sólidos Totais do efluente das colunas em condições não saturadas abastecida com chorume, o qual apresentou um valor médio igual à 7.391,0 mg/l de Sólidos Totais.

Observa-se que analogamente a eficiência da remoção de matéria orgânica, para as colunas com densidades de 1,15 e 1,30 tem-se eficiências iniciais altas, apresentando forte tendência de queda após a saturação do sistema, e para a coluna com densidade de 1,50 nota-se resultados discrepantes, com uma eficiência inicial baixa, devido a grande quantidade de solo arrastado, salientando-se ainda as interferências relativas ao baixo escoamento.

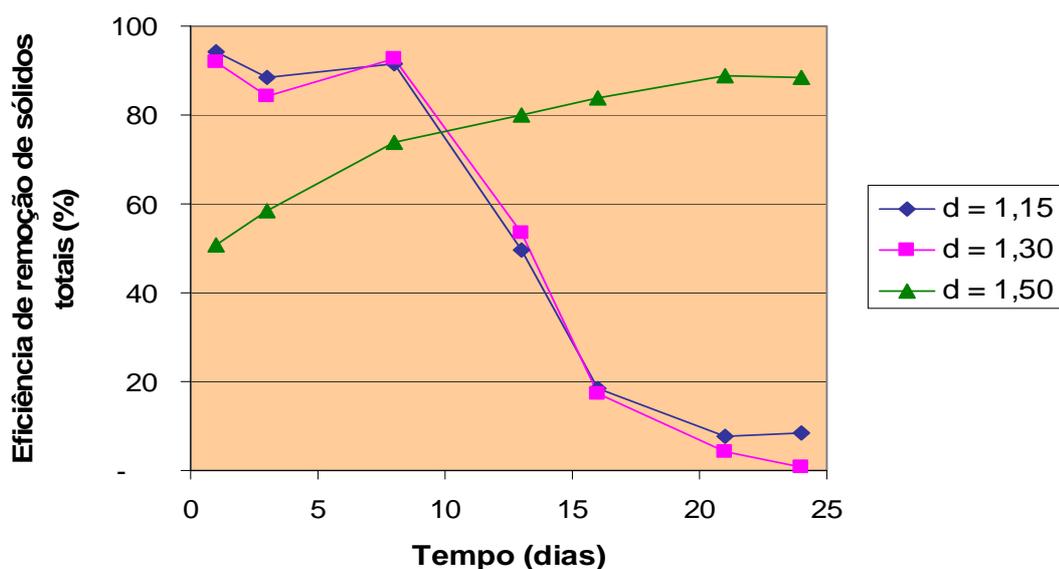


Figura 5-80: Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l), no efluente das colunas em condições não saturadas.

Após o término desta campanha de ensaios, as colunas foram desmontadas e o solo removido foi submetido à análise de solubilização, segundo critérios da norma NBR 10.006 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, no período de 10/04/03 à 17/04/03, sendo que os resultados estão expostos na Tabela 5-2.

Ressalta-se que para a execução do ensaio cada coluna foi dividida em três partes (inferior, intermediária e superior), sendo retirada uma amostra de cada parte para a realização do ensaio. Os parâmetros analisados foram pH, Condutividade e DQO.

Cabe lembrar que a coluna 2, preenchida com solo com densidade de 1,30 em condições saturadas e a coluna 6, preenchida com solo com densidade de 1,67 em condições não saturadas, não tiveram continuidade de alimentação após a segunda etapa desta campanha de amostragem, portanto devendo-se considerar esta condição em eventuais comparações.

Comparando-se as colunas 3, 4 e 5, com densidades de 1,15; 1,30 e 1,50 respectivamente, as quais tiveram alimentações contínuas nas três etapas da campanha, pode-se notar que quanto maior densidade maior a capacidade de retenção de matéria orgânica.

Tabela 5-2: Resultados da análise de solubilização do solo utilizado nas colunas de percolação, após a segunda campanha de ensaios.

Amostra		pH	Condutividade (µs/cm)	DQO (mg/l)	DQO Média (mg/l)
Coluna 1	Inferior	8,38	479,0	68,0	61,3
	Intermediária	8,33	472,0	64,0	
	Superior	8,14	512,0	52,0	
Coluna 2	Inferior	8,02	153,0	112,0	94,0
	Intermediária	8,25	101,1	52,0	
	Superior	8,48	128,5	118,0	
Coluna 3	Inferior	8,02	850,0	117,0	94,7
	Intermediária	7,98	697,0	94,0	
	Superior	7,14	714,0	73,0	
Coluna 4	Inferior	7,78	800,0	115,0	139,7
	Intermediária	7,70	698,0	108,0	
	Superior	6,68	666,0	196,0	
Coluna 5	Inferior	6,53	216,0	250,0	373,7
	Intermediária	7,28	539,0	395,0	
	Superior	7,40	977,0	476,0	
Coluna 6	Inferior	7,69	190,1	126,0	120,0
	Intermediária	7,80	138,1	119,0	
	Superior	8,22	111,3	115,0	
Solo Natural		7,92	9,7	<1,0	

5.3 TERCEIRA CAMPANHA DE ENSAIOS

Para a terceira campanha de ensaios, utilizou-se colunas preenchidas com solo compactado com densidades de 1,15; 1,30 e 1,50, em duplicata, todas em condições não saturadas, alimentando uma com um volume de 0,25 litros de chorume e outra com 0,25 litros de água, por dia ao longo de 20 dias, o que representa uma taxa concentrada diária de $0,034 \text{ m}^3 \text{ chorume} / \text{m}^3 \text{ SoloSeco}$, sendo avaliado os parâmetros DQO para todas as amostras coletadas e Sólidos Totais, pH, Condutividade e Alcalinidade, para amostras compostas ao longo da semana, totalizando 3 amostras, porém foram formadas 4 amostras compostas durante esta campanha, sendo que, para o efluente das colunas abastecidas com chorume analisou-se ainda os metais: Zinco, Cádmio e Chumbo para as 4 amostras, e para as colunas abastecidas com água, analisou-se os mesmos metais para 2 amostras.

Ressalta-se ainda que para esta terceira campanha de ensaios, utilizou-se chorume coletado em uma caixa de passagem próxima a frente de operação, obtendo-se assim, um chorume com características de chorume novo, diferente do utilizado nas campanhas anteriores, tentando assim avaliar mais esta variável do sistema.

À seguir são apresentados os resultados, divididos entre as colunas abastecidas com chorume e colunas abastecidas com água.

Abastecimento com chorume

Ressalta-se que se utilizou nos cálculos da eficiência e da carga removida, a DQO média do chorume, ou seja, 20.863 mg/l, obtida com a realização de ensaios periódicos durante toda a campanha.

Nos gráficos à seguir são apresentados os resultados obtidos para as análises de DQO, pH, Condutividade, Alcalinidade e Metais, para as colunas com densidades de 1,15; 1,30 e 1,50 em condições não saturadas, abastecidas com chorume. Em anexo são apresentadas as tabelas contemplando todos os resultados obtidos.

Nas Figuras 5.81 à 5.83, são apresentadas as relações do volume aplicado e coletado nas colunas, sendo observado uma boa resposta em termos de velocidade de escoamento para todas as colunas.

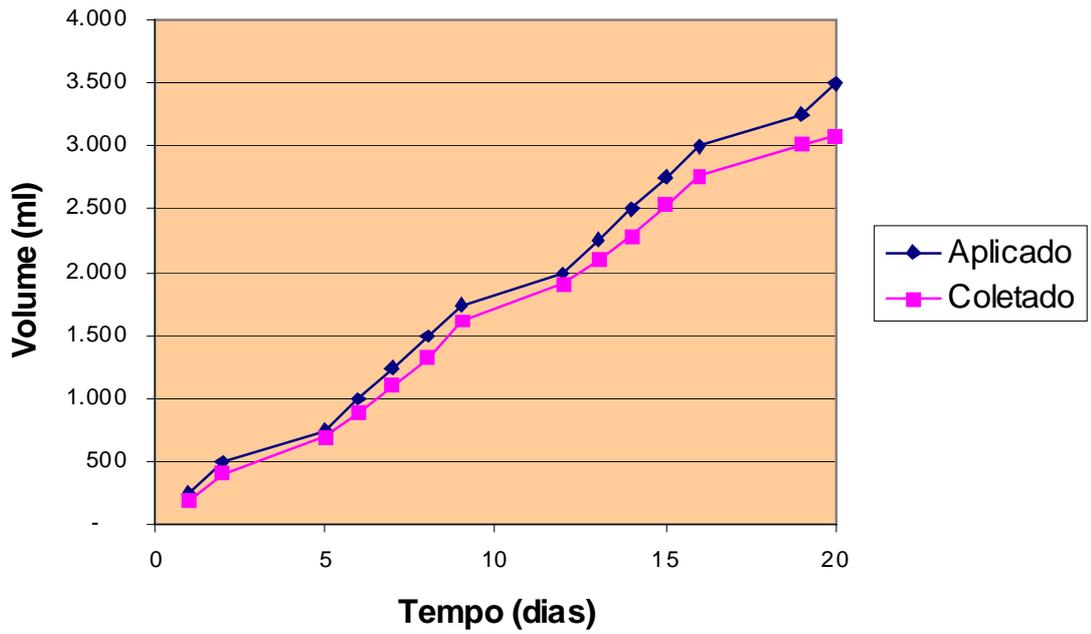


Figura 5-81: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15.

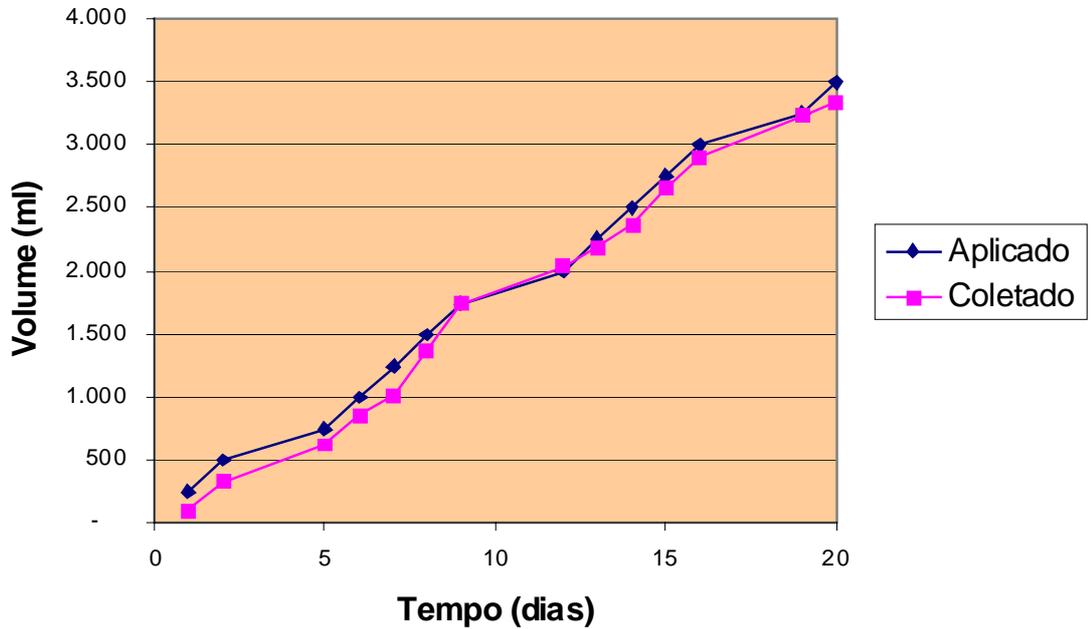


Figura 5-82: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30.

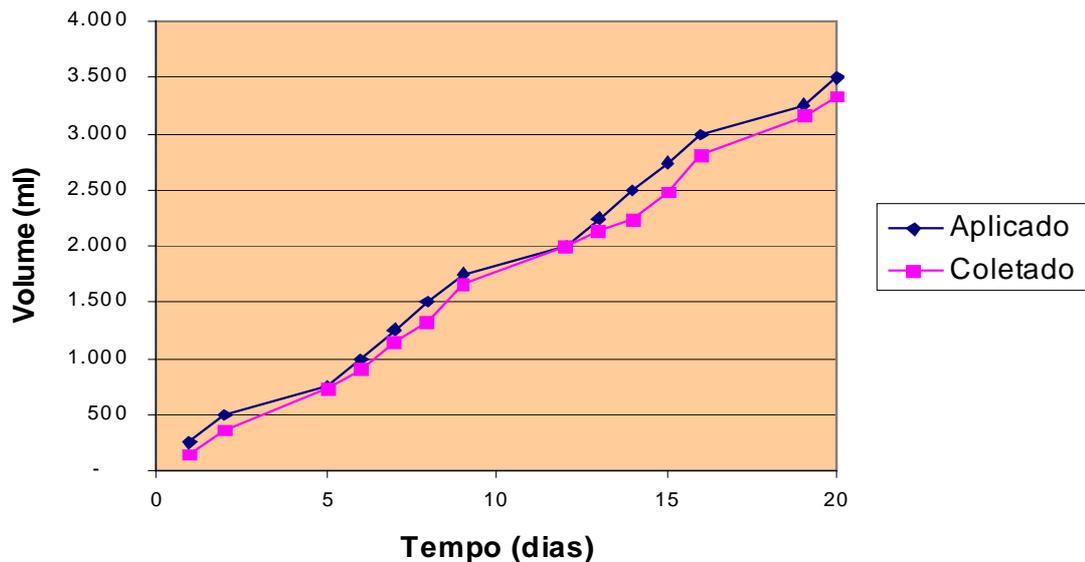


Figura 5-83: Relação do volume de chorume aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,50.

Na Figura 5-84 à Figura 5-86 são apresentados os resultados as análises de DQO efetuadas com os efluentes das colunas em condições não saturadas, alimentada com chorume, nesta terceira campanha.

Observa-se que mesmo utilizando um chorume com característica de aterros novos, ou seja, com uma alta carga de DQO, o sistema apresentou uma alta eficiência inicial, com valores acima de 90 %, para a aplicação de um volume equivalente a aproximadamente 200 litros de chorume por metro cúbico de solo, sendo que após a saturação observa-se claramente a queda de eficiência do sistema.

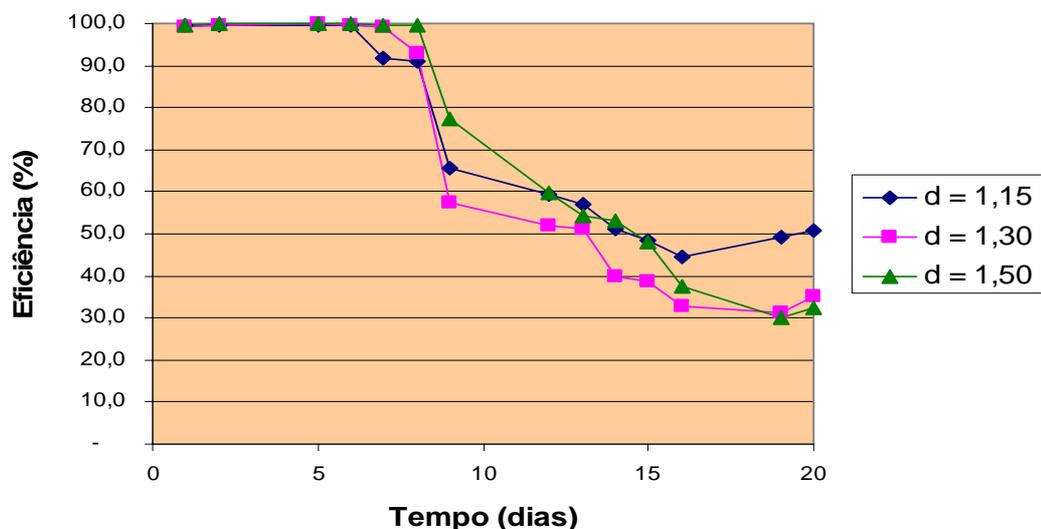


Figura 5-84: Eficiência de remoção de DQO para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3 \text{ chorume} / \text{m}^3 \text{ SoloSeco}$

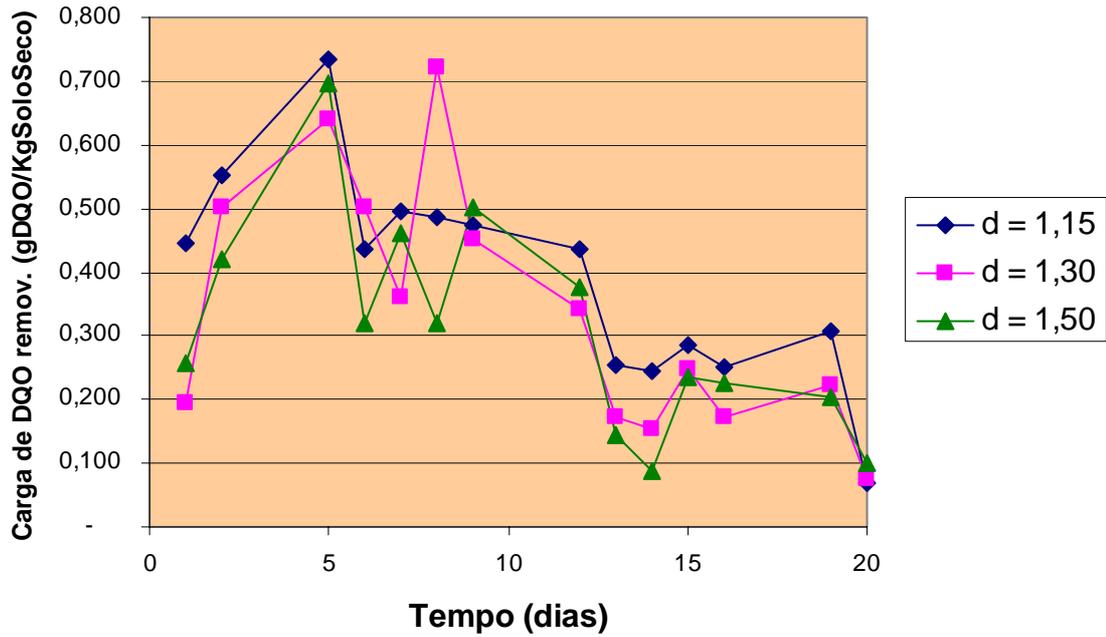


Figura 5-85: Carga de DQO removida para alimentação diária, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3 \text{ chorume} / \text{m}^3 \text{ SoloSeco}$

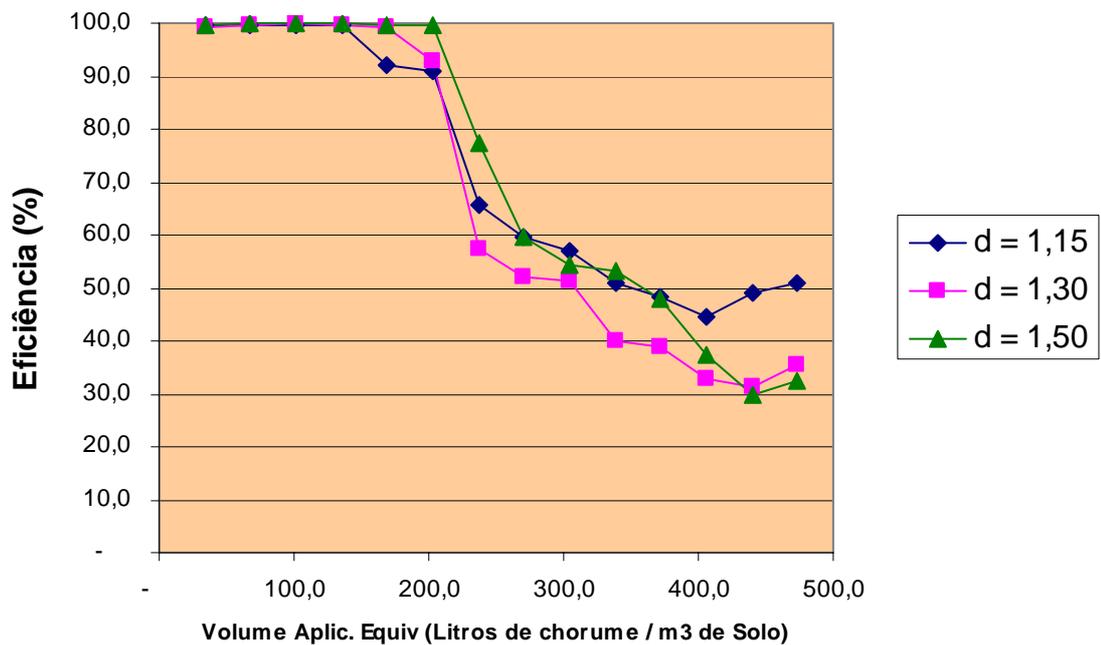


Figura 5-86: Eficiência de remoção de DQO em função do volume aplicado por metro cúbico de solo seco.

Na Figura 5-87 à Figura 5-89, são apresentados os valores do pH, da Condutividade e da Alcalinidade, respectivamente, para a amostra composta semanal, do efluente coletado nas colunas em condições não saturadas, para o abastecimento com chorume.

Nota-se valores iniciais de pH muito próximos ao do chorume, apresentando uma tendência brusca de queda seguida de novo acréscimo. Para aos valores de condutividade nota-se valores iniciais baixos, apresentados tendência de acréscimo em função da redução da eficiência acarretando em aumento de contaminantes, o que influencia diretamente na condutividade.

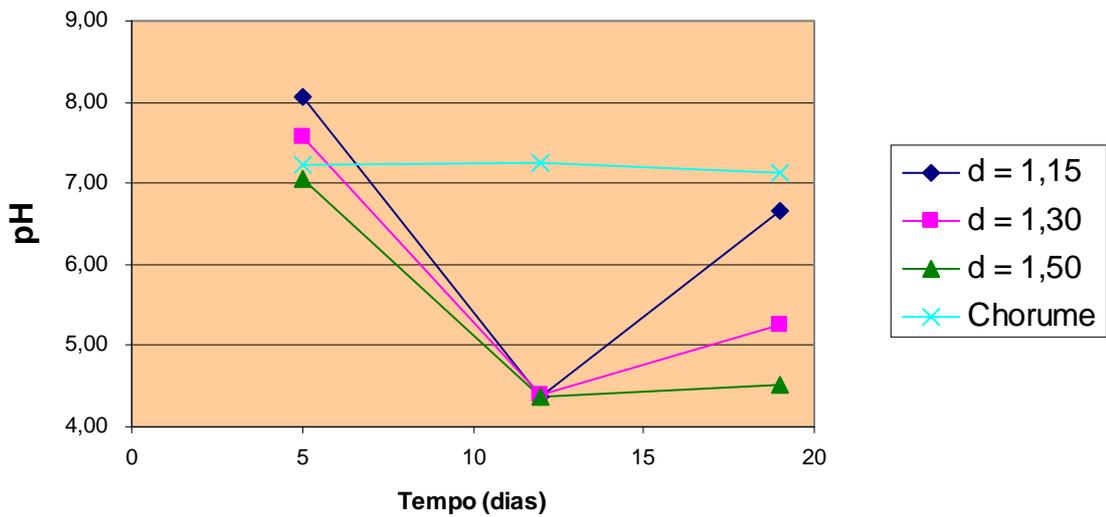


Figura 5-87: Valores do pH para as amostras compostas, dos efluentes coletados.

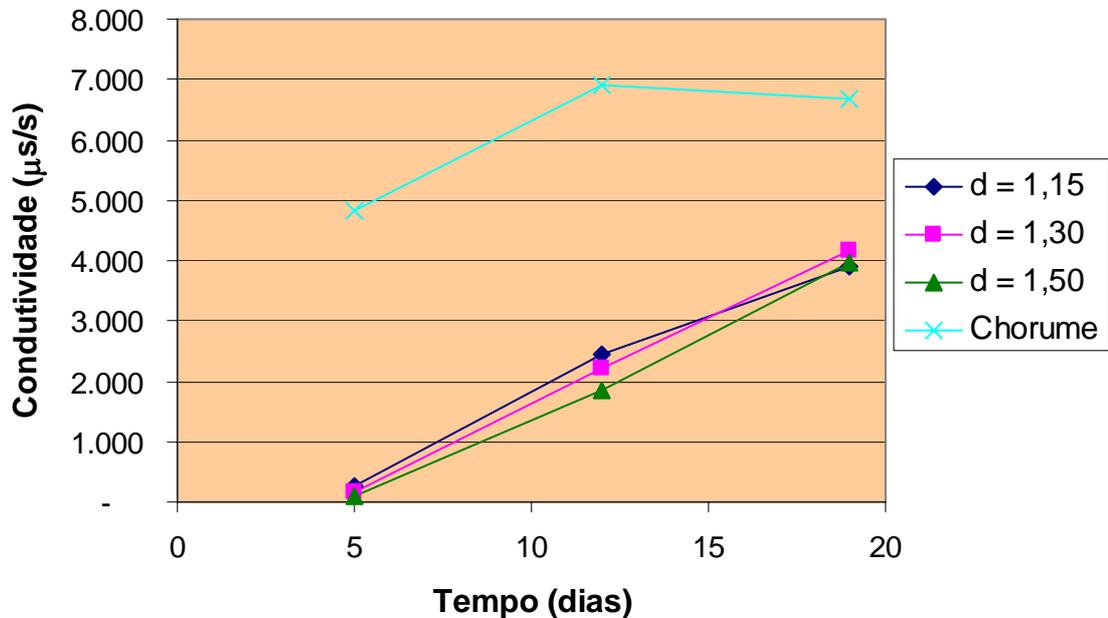


Figura 5-88: Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^{\circ}\text{C}$, para as amostras coletadas

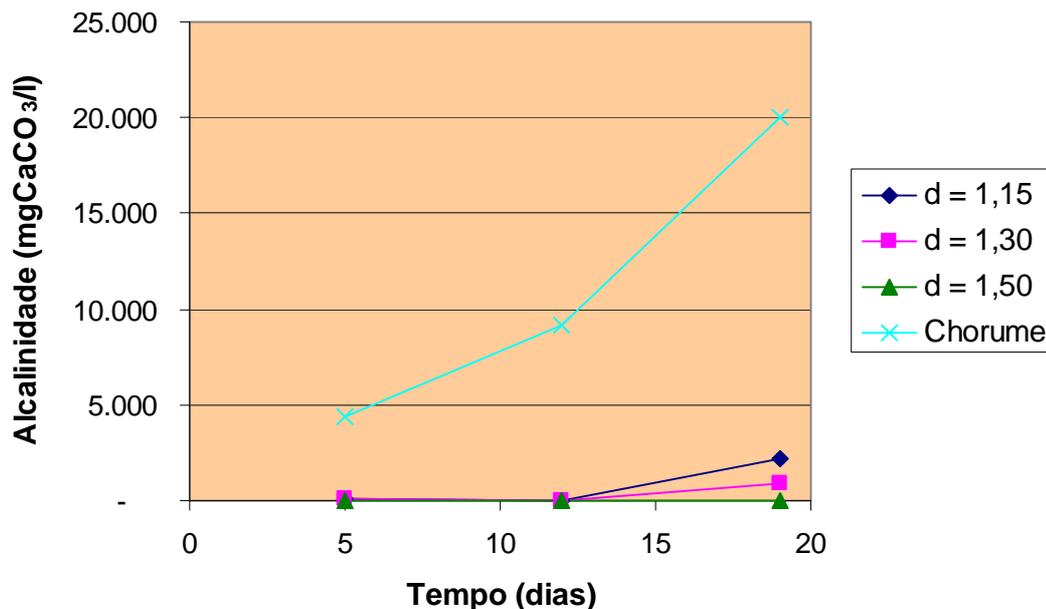


Figura 5-89: Alcalinidade (mgCaCO₃/l), para as amostras dos efluentes coletados.

Na Figura 5-90, são apresentados os resultados dos valores de Sólidos Totais das amostras compostas semanalmente do efluente das colunas em condições não saturadas abastecida com chorume, o qual apresentou um valor médio igual à 26.711 mg/l de Sólidos Totais.

Observa-se que analogamente a eficiência da remoção de matéria orgânica, tem-se eficiências iniciais altas, apresentando forte tendência de queda após a saturação do sistema.

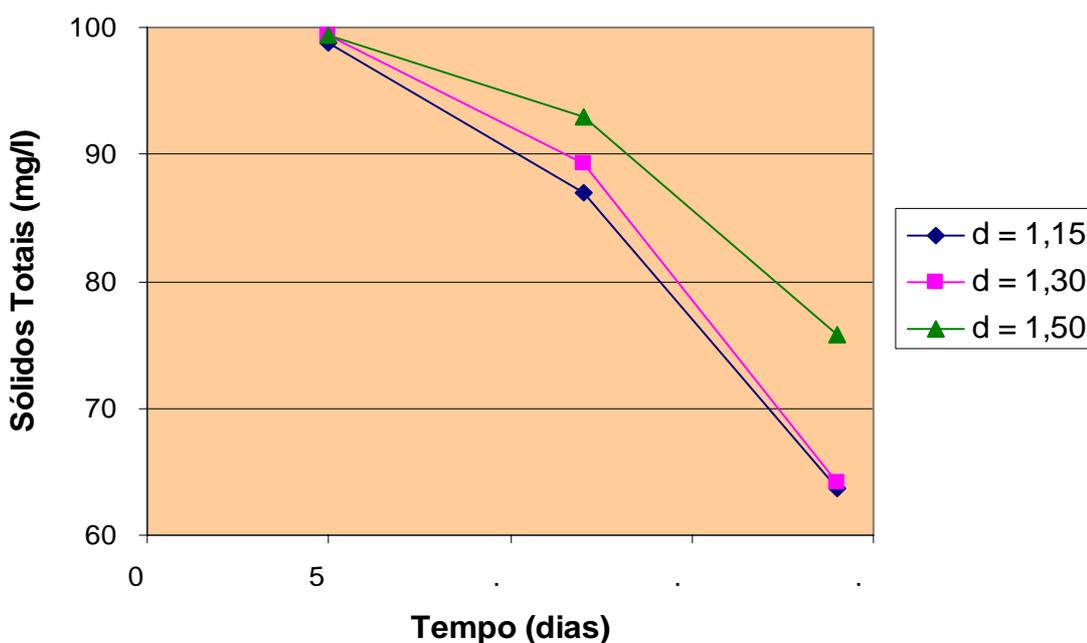


Figura 5-90: Redução de Sólidos Totais (%), tendo como referência os Sólidos Totais do chorume utilizado no abastecimento, obtido através da realização de ensaios durante toda a campanha de ensaios, sendo obtida a média de 26.711 mg/l.

Na Figura 5-91 à Figura 5-93 são apresentados os valores obtidos para as análises dos metais Cádmio Chumbo e Zinco, respectivamente, efetuadas para as amostras compostas semanalmente, somente nesta campanha de ensaios.

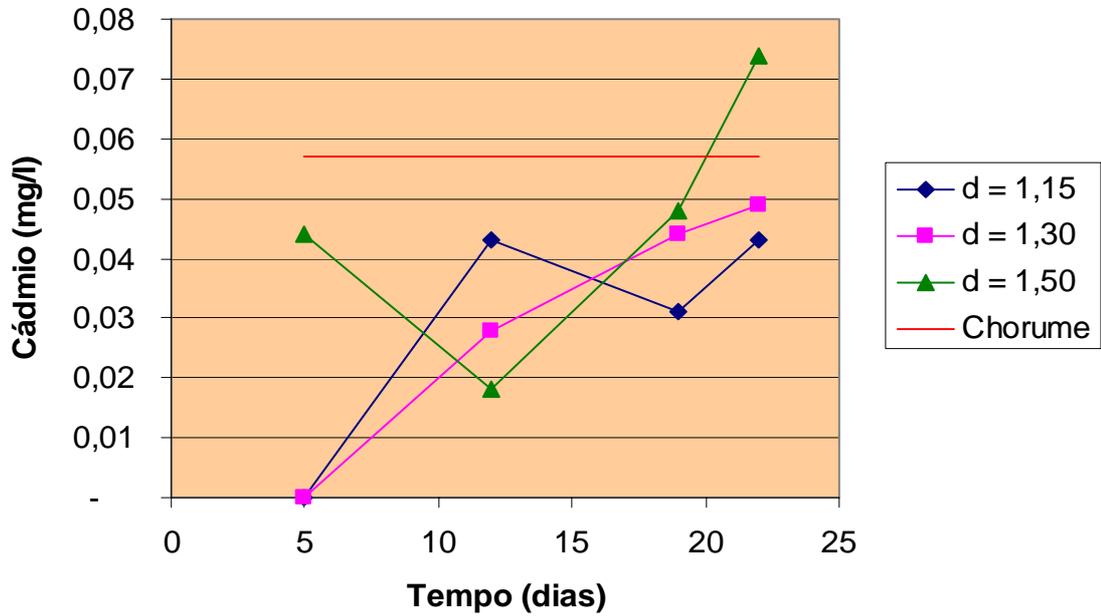


Figura 5-91: Concentração de Cádmio no efluente das colunas abastecidas com chorume (mg/l).

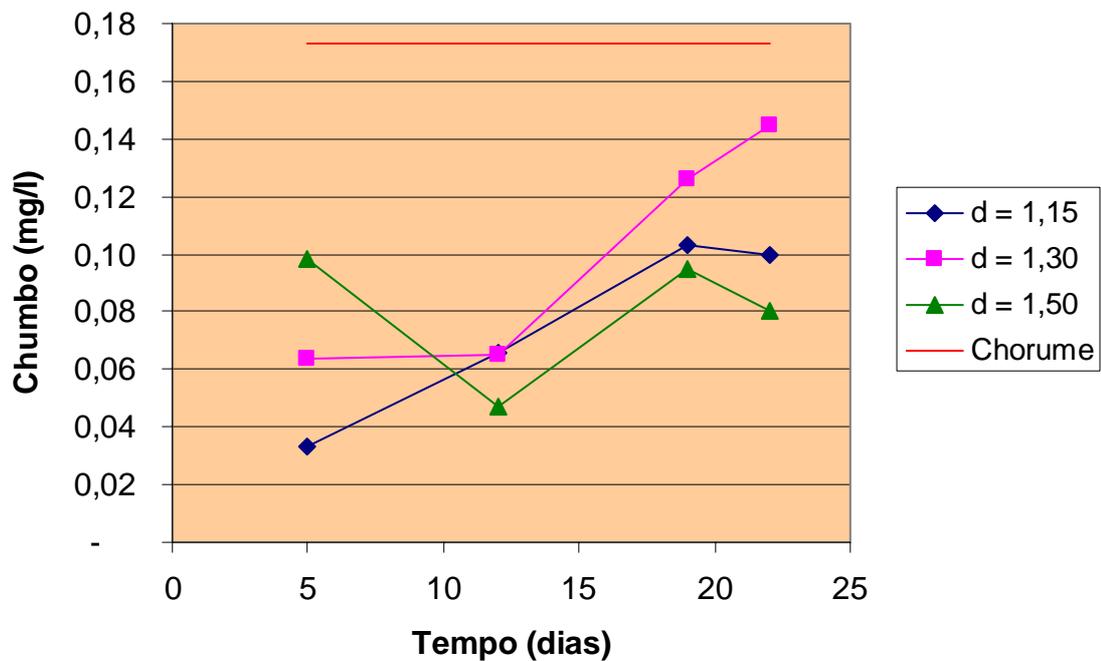


Figura 5-92: Concentração de Chumbo no efluente das colunas abastecidas com chorume (mg/l).

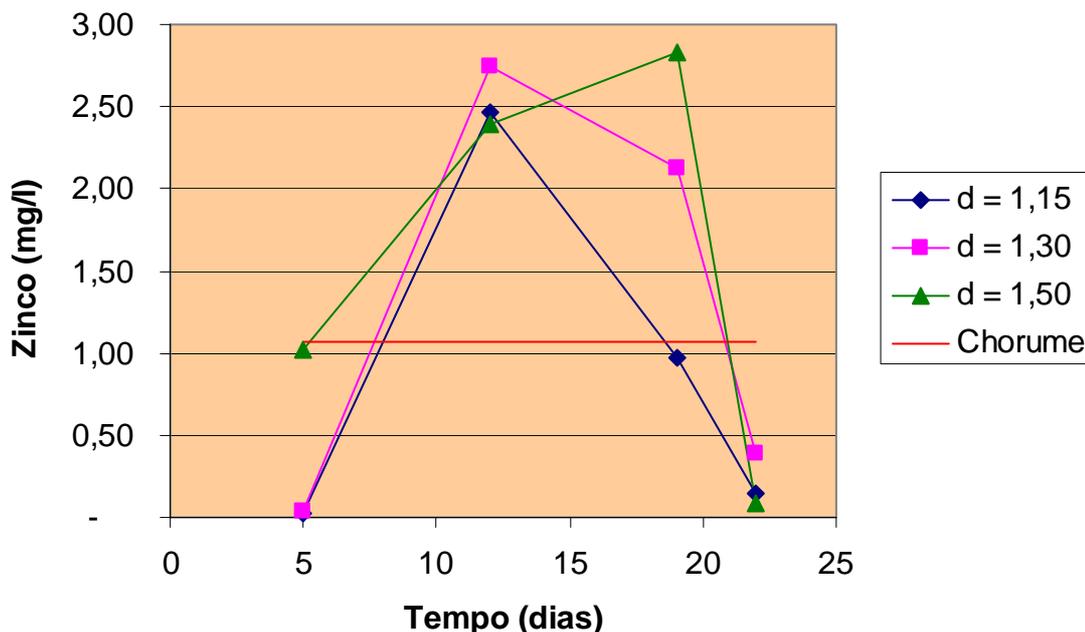


Figura 5-93: Concentração de Zinco no efluente das colunas abastecidas com chorume (mg/l).

Ressalta-se que para os metais analisados, não foi possível obter-se resultados relevantes para uma análise mais criteriosa, devido também ao número reduzido de amostras, apresentando valores discrepantes e não conclusivos.

Abastecimento com água

Abaixo são apresentados os resultados das análises dos efluentes das colunas preenchidas com solo com densidades de 1,15; 1,30 e 1,50, e abastecidas com água, durante a terceira campanha de ensaios.

Salienta-se que foram realizadas análises de DQO da água utilizada no abastecimento, porém obtendo-se valores iguais ou muito próximos à zero, portanto considerou-se que a água utilizada era isenta de carga orgânica.

Na Tabela 5-3 são apresentados os resultados das análises de metais (Cd, Pb e Zn) da água utilizado no abastecimento das colunas. Na Tabela 5-4 à Tabela 5-6, são apresentados os valores obtidos para as análises de metais (Cd, Pb e Zn) efetuadas para as amostras compostas semanalmente, somente nesta campanha de ensaios.

Tabela 5-3: Concentração de Metais (Cd, Pb e Zn) na água utilizada no abastecimento das colunas (mg/l)

	Cádmio	Chumbo	Zinco
Água	N.D.	N.D.	N.D.

Tabela 5-4: Concentração de Cádmio no efluente das colunas abastecidas com água (mg/l)

Data	Dias	Coluna 2	Coluna 4	Coluna 6
12/05/04	5	N.D.	N.D.	N.D.
26/05/04	19	N.D.	N.D.	N.D.

Tabela 5-5: Concentração de Chumbo no efluente das colunas abastecidas com água (mg/l)

Data	Dias	Coluna 2	Coluna 4	Coluna 6
12/05/04	5	0,064	0,044	0,022
26/05/04	19	N.D.	N.D.	N.D.

Tabela 5-6: Concentração de Zinco no efluente das colunas abastecidas com água (mg/l)

Data	Dias	Coluna 2	Coluna 4	Coluna 6
12/05/04	5	0,034	0,021	0,099
26/05/04	19	N.D.	0,046	N.D.

Conforme exposto anteriormente não foi possível obter-se resultados relevantes para uma análise mais criteriosa quanto aos metais analisados, devido também ao número reduzido de amostras, apresentando valores discrepantes e não conclusivos.

Nos gráficos à seguir são apresentados os resultados obtidos para as análises de DQO, pH, Condutividade, Alcalinidade e Metais, para as colunas com densidades de 1,15; 1,30 e 1,50 em condições não saturadas, abastecidas com água. Em anexo são apresentadas as tabelas contemplando todos os resultados obtidos.

Nas Figuras 5.94 à 5.96, são apresentadas as relações do volume aplicado e coletado nas colunas, sendo observado uma boa resposta em termos de velocidade de escoamento para todas as colunas.

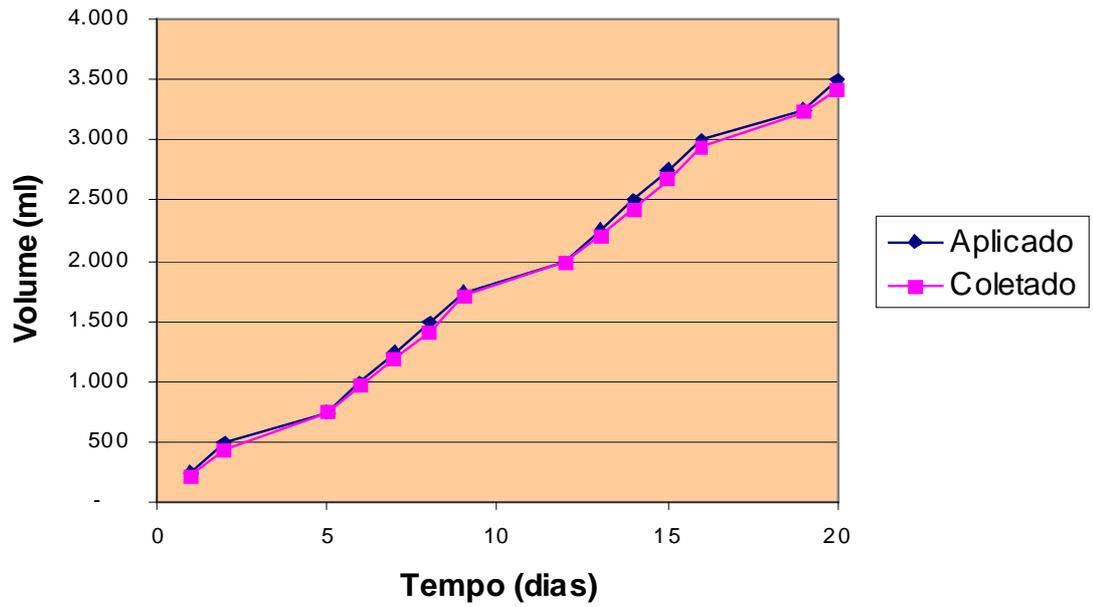


Figura 5-94: Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,15.

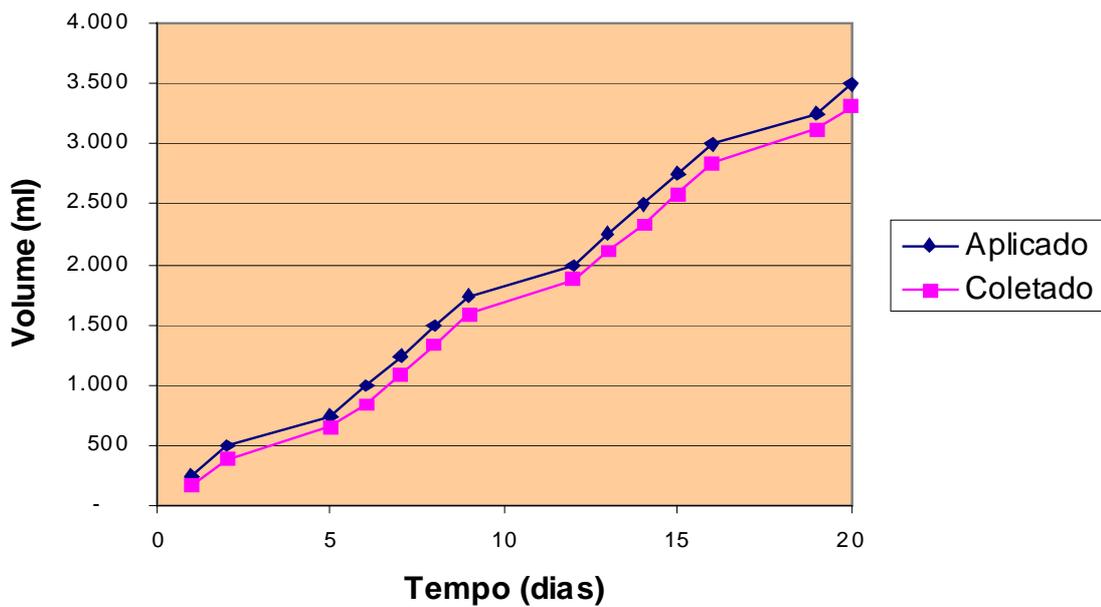


Figura 5-95: Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,30.

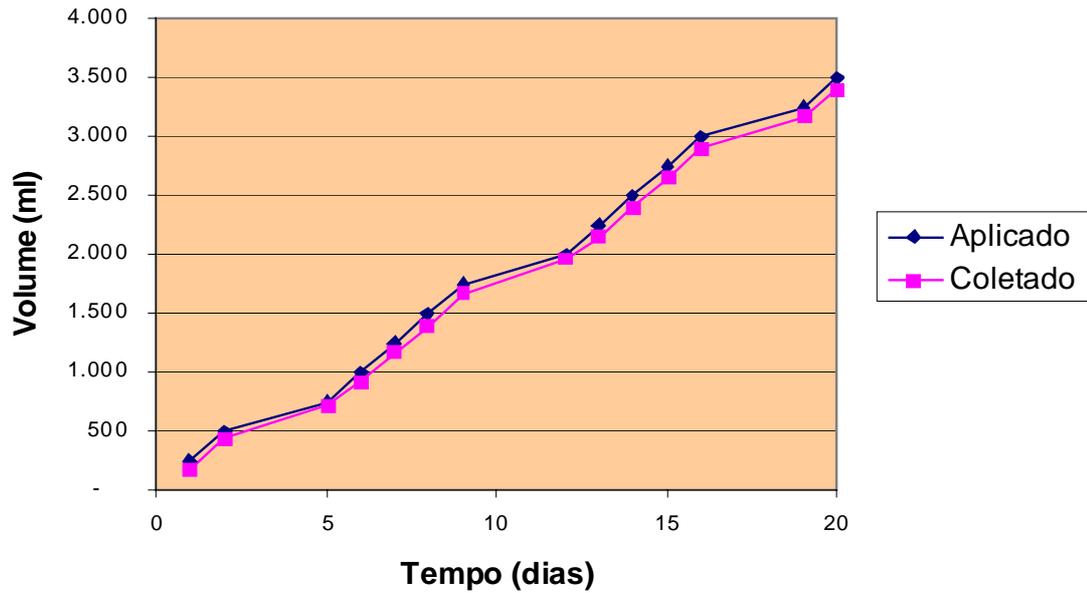


Figura 5-96: Relação do volume de água aplicado e coletado em função dos dias, para a coluna com densidade igual a 1,50.

Na Figura 5-97 e na Figura 5-98 são apresentados os resultados as análises de DQO efetuadas com os efluentes das colunas alimentadas com água, nesta terceira companhia de ensaios.

Observa-se resultados relativamente baixos, porém que ocorrem em função do arraste de matéria orgânica do próprio solo, apresentado tendência de queda, devido a “lavagem” das colunas.

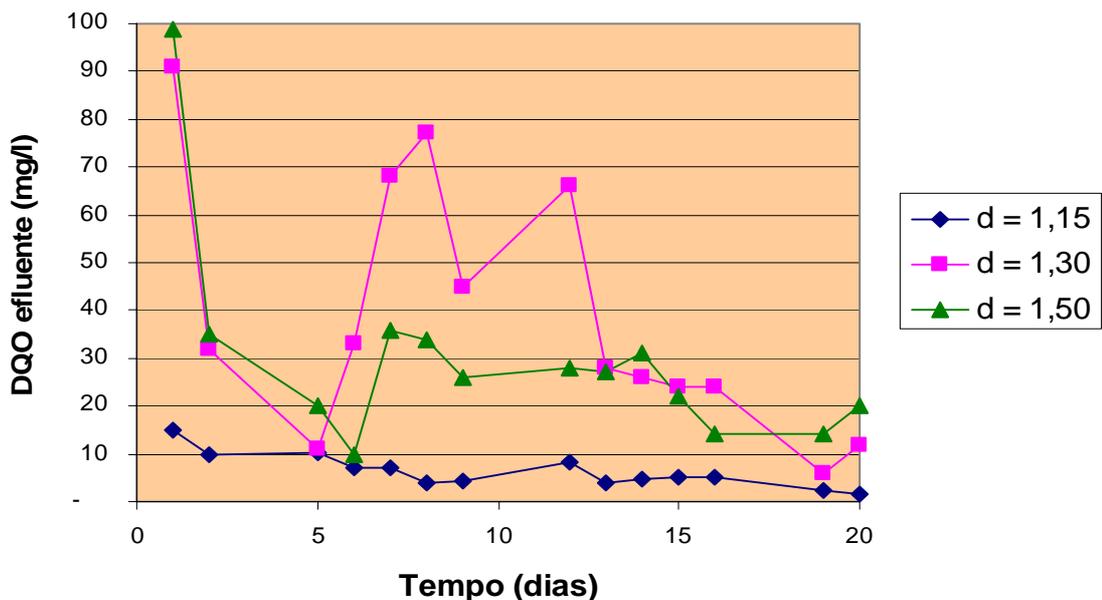


Figura 5-97: DQO efluente, para alimentação diária com água, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3 \text{chorume}/\text{m}^3 \text{SoloSeco}$.

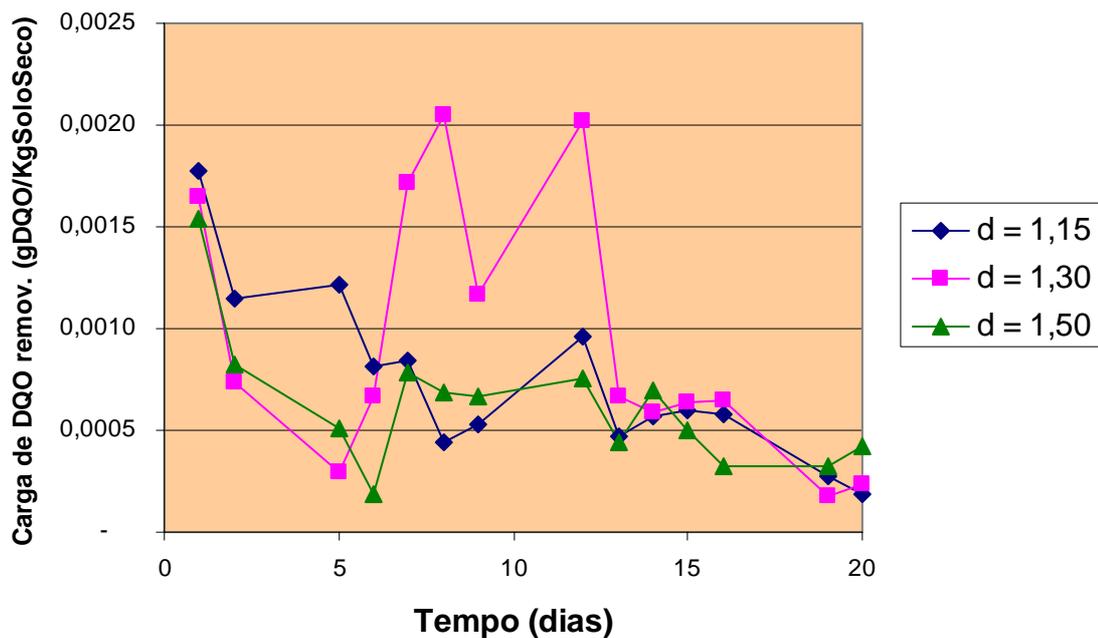


Figura 5-98: Carga de DQO efluente para alimentação diária com água, com taxa de aplicação hidráulica diária de $0,034 \text{ m}^3 \text{ chorume} / \text{m}^3 \text{ SoloSeco}$.

Na Figura 5-99 à Figura 5-101, são apresentados os valores do pH, da Condutividade e da Alcalinidade, respectivamente, do efluente coletado nas colunas em condições não saturadas, para o abastecimento com água.

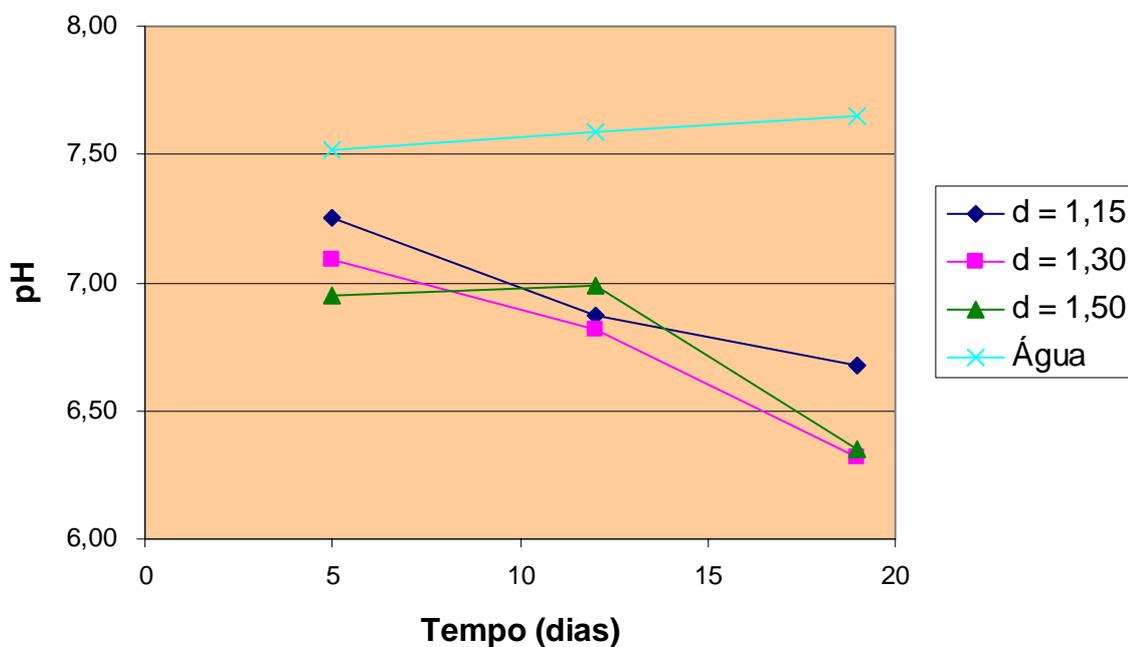


Figura 5-99: Valores do pH para as amostras coletadas

Nota-se valores iniciais de pH próximos ao da água, apresentando uma tendência de queda sendo que o mesmo foi observado para as colunas abastecidas com chorume. Para aos valores de condutividade nota-se para as colunas com densidades de 1,15 e 1,30 valores iniciais baixos, apresentando tendência de acréscimo, sendo que o efluente da coluna com densidade se 1,50 apresentou valores muito próximos ao da água.

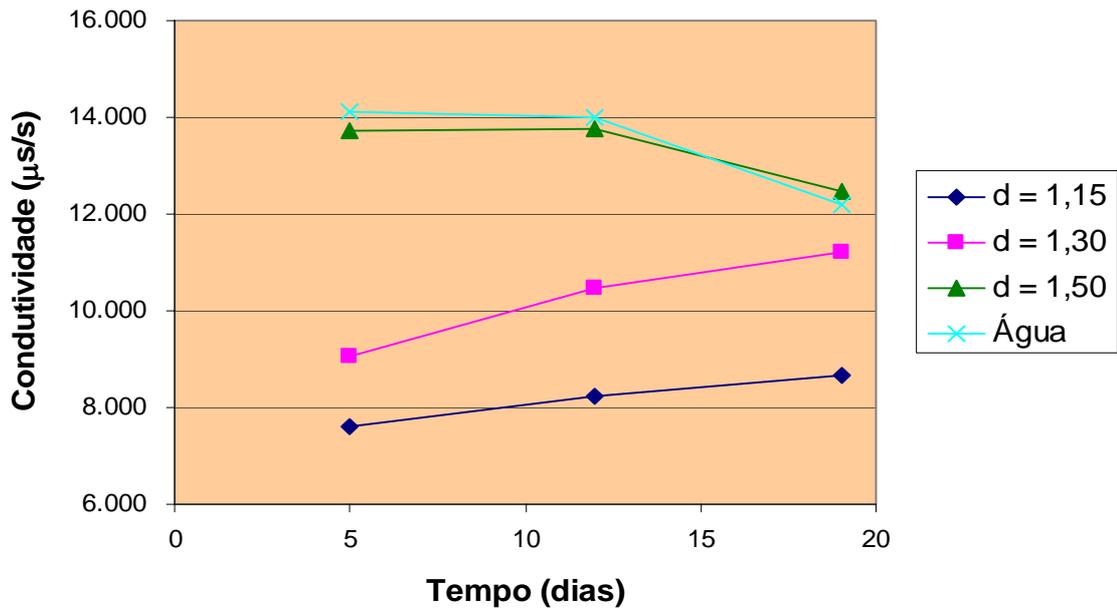


Figura 5-100: Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^\circ\text{C}$, para as amostras coletadas

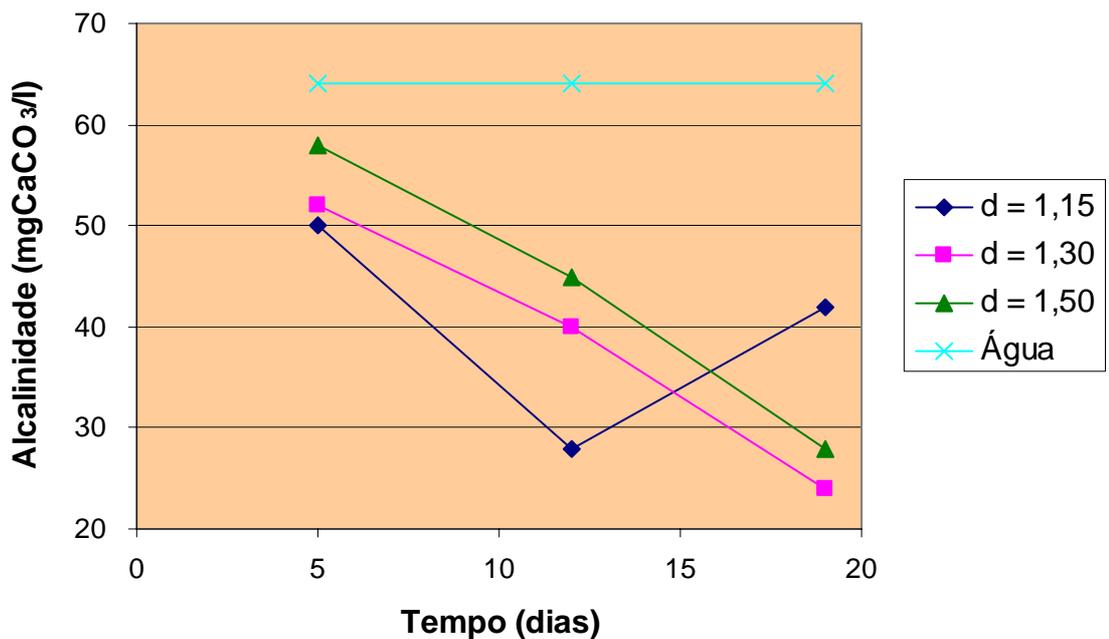


Figura 5-101: Alcalinidade (mgCaCO_3/l) .

Na Figura 5-102, são apresentados os resultados dos valores de Sólidos Totais das amostras compostas semanalmente do efluente das colunas em condições não saturadas abastecida com água, a qual apresentou um valor médio igual à 124 mg/l de Sólidos Totais.

Observa-se que existe uma tendência de acréscimo de sólidos totais em função do tempo, conforme observado na segunda etapa da segunda campanha, durante o abastecimento com água, devido ao arraste de material fino do solo.

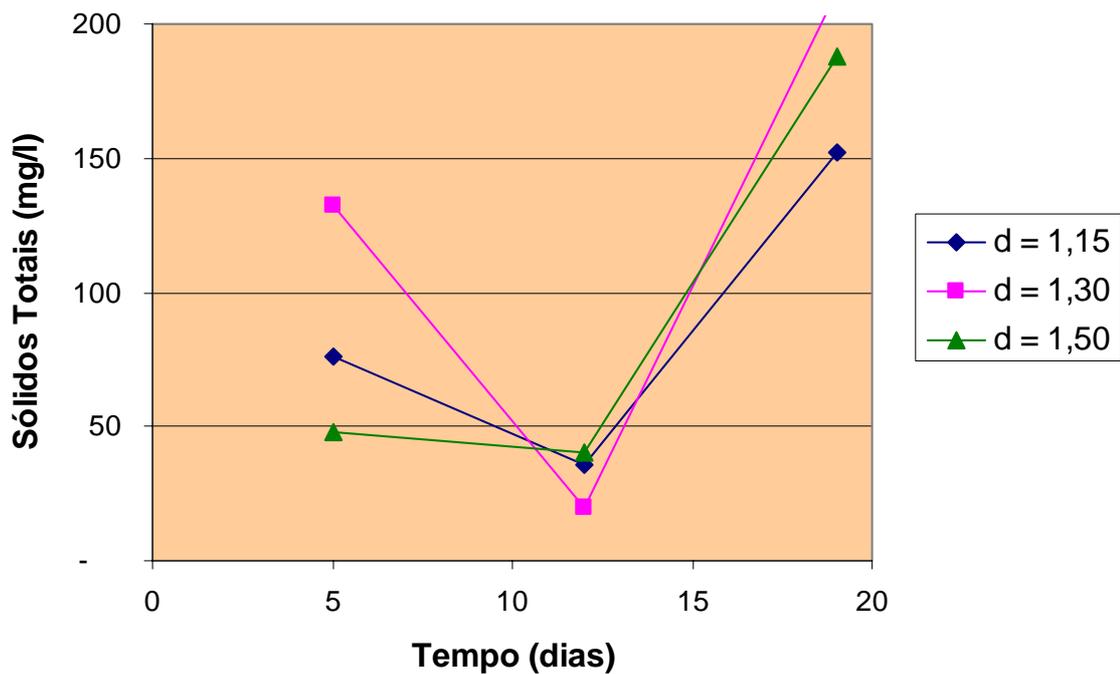


Figura 5-102: Sólidos Totais (mg/l) do efluente das colunas, descontando-se os Sólidos Totais da água utilizada no abastecimento das mesmas, obtido através da realização de ensaios da água durante toda a campanha de ensaios, sendo obtida a média de 124 mg/l.

5.4 RELAÇÃO DE SOLO NECESSÁRIO PARA COBERTURA E CHORUME GERADO, EM UM ATERRO SANITÁRIO

Para que se possa ter uma idéia da disponibilidade de solo para a cobertura diária dos resíduos durante a vida útil de um aterro sanitário, apresenta-se à seguir uma simulação da relação de volume de solo para cobertura e volume de chorume gerado, para a avaliação da viabilidade técnica da proposta deste estudo.

Considerou-se nesta estimativa um projeto real para a instalação de um aterro sanitário em uma cidade do interior de São Paulo, cuja concepção se deu no ano de 2003.

5.4.1 ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE LIXO A SER DISPOSTO

A estimativa da quantidade de lixo que será disposto no aterro sanitário considerado, até o final de sua vida útil, pode ser determinado conhecendo-se a taxa de geração *per capita* de lixo, a projeção do crescimento populacional, a densidade de lixo aterrado, a proporção de terra para cobertura e o *layout* definido na concepção geométrica do aterro.

Portanto, inicialmente deve-se conhecer a taxa de geração *per capita* de lixo e a projeção do crescimento populacional. Embora a taxa de geração *per capita* possa se alterar durante a vida útil do aterro, fica difícil estimar tal variação sem dados consistentes, resultante do controle de fluxo ao longo dos anos. Por outro lado a dinâmica do crescimento populacional pode ser melhor avaliada através de levantamentos do IBGE.

Para o município considerado os dados populacionais foram obtidos através da Fundação SEADE e são apresentados na Tabela 5-7.

A partir desses dados e considerando-se os parâmetros mostrados na Tabela 5-8, efetuou-se a projeção populacional e correspondente em lixo até o ano de 2019, como mostrado na Tabela 5-9. Esses valores foram acumulados ao longo desses anos e comparados com o volume definido pela configuração geométrica do aterro.

Tabela 5-7: Censos demográficos para o município considerado (SEADE, 2002)

Ano do Censo	População		
	Total	Rural	Urbana
1980	136.425	7.170	129.255
1991	164.980	5.279	159.701
1996	178.672	4.611	174.061
2000	189.186	3.957	185.229

Tabela 5-8: Parâmetros adotados para estimativa da quantidade de lixo a ser disposta no aterro.

Projeção de população			Índices Adotados		
Taxas adotadas	Total	1,51%	Geração per capita de lixo	0,6	kg/hab.dia
	Urbana	1,57%	Massa específica	0,5	t/m ³
	Rural	-1,47%	Vol. Cobertura	20%	do total

Tabela 5-9: Quantidade de lixo gerado e respectivo volume a ser ocupado em um aterro sanitário.

Ano	População (hab)			Quantidade de Lixo Urbano					
	Total	Rural	Urbana	Massa			Volume no Aterro		
				t/dia	t/ano	Soma	m ³ /dia	m ³ /ano	Soma
2003	197.886	3.804	194.082	116	42.504	42.504	291	106.260	106.260
2004	200.874	3.748	197.126	118	43.171	85.675	296	107.927	214.187
2005	203.907	3.689	200.218	120	43.848	129.522	300	109.619	323.806
2006	206.986	3.628	203.358	122	44.536	174.058	305	111.339	435.145
2007	210.112	3.564	206.548	124	45.234	219.292	310	113.085	548.230
2008	213.285	3.497	209.788	126	45.944	265.235	315	114.859	663.089
2009	216.505	3.427	213.078	128	46.664	311.900	320	116.660	779.749
2010	219.774	3.354	216.420	130	47.396	359.296	325	118.490	898.239
2011	223.093	3.278	219.815	132	48.139	407.435	330	120.349	1.018.588
2012	226.462	3.199	223.262	134	48.894	456.330	335	122.236	1.140.824
2013	229.881	3.117	226.764	136	49.661	505.991	340	124.153	1.264.977
2014	233.353	3.032	230.321	138	50.440	556.431	345	126.101	1.391.078
2015	236.876	2.943	233.933	140	51.231	607.663	351	128.079	1.519.156
2016	240.453	2.850	237.603	143	52.035	659.698	356	130.087	1.649.244
2017	244.084	2.755	241.329	145	52.851	712.549	362	132.128	1.781.372
2018	247.770	2.655	245.114	147	53.680	766.229	368	134.200	1.915.572
2019	251.511	2.552	248.959	149	54.522	820.751	373	136.305	2.051.877

5.4.2 VIDA ÚTIL DO ATERRO E DEMANDA DE SOLO PARA COBERTURA

A análise da vida útil foi baseada na soma acumulada das capacidades de cada célula ou camada de lixo no aterro, distribuídas conforme indicado na Tabela 5-10.

Tabela 5-10: Capacidade volumétrica das camadas e vida útil do sistema.

Camada ou Célula	Área Média	Altura Média de Lixo	Capacidade Volumétrica (m ³)		Ano de Operação	Vida útil (anos)
			Unitária	Soma		
C-1A	7.060	4,5	31.770	31.770	2003	0
C-2A	11.093	4,5	49.919	81.689	2003	0
C-3A	18.210	4,5	81.945	163.634	2004	1
C-4A	25.862	4,5	116.379	280.013	2005	2
C-5A	40.239	4,5	181.076	461.088	2007	4
C-6A	49.750	4,5	223.875	684.963	2009	6
C-7A	31.840	4,5	143.280	828.243	2010	7
C-1B	21.977	4,5	98.897	927.140	2011	8
C-2B	35.450	4,5	159.525	1.086.665	2012	9
C-3B	44.980	4,5	202.410	1.289.075	2014	11
C-4B	47.323	4,5	212.954	1.502.028	2015	12
C-5B	42.198	4,5	189.891	1.691.919	2017	14
C-6B	29.696	4,5	133.632	1.825.551	2018	15

Comparando-se o volume final disponível com aquele apresentado na Tabela 5-9, observa-se que o limite será de 15 anos, sendo disposto um volume total de resíduos de 1.825.551 m³. Considera-se, para projeto, conforme apresentado na Tabela 5-8, que o volume de solo necessário para a cobertura diária dos resíduos é estimado em 20 % do volume de resíduos dispostos, ou seja, neste caso, aproximadamente 365.110 m³, porém deve-se considerar esta como a condição ideal, sujeita a variações devido a disponibilidade de solo no local.

5.4.3 GERAÇÃO DE CHORUME

O potencial de formação do chorume pode ser determinado através do balanço de água no aterro. O balanço corresponde à soma de quantidades que entram e a subtração de quantidades de água que são consumidas nas reações químicas e a quantidade de água que deixa o aterro como vapor. O potencial, portanto corresponde à quantidade de água que excede a capacidade de retenção de umidade da massa aterrada.

A água que entra no aterro é representada principalmente pela umidade contida na massa de lixo e cobertura diária e aquela resultante do balanço entre precipitação, evapotranspiração, e da capacidade de campo da cobertura.

As quantidades de água consumida nas reações químicas e pela perda como vapor, são relativamente pequenas, quando comparadas ao resultante da precipitação e não foram consideradas no presente balanço. Isto é particularmente válido em regiões tropicais.

A parcela correspondente ao percolado resultante do balanço hídrico sobre a camada de cobertura do aterro será determinada com base no balanço proposto por Hanley e Geare (1975), descrito por Rocca (CETESB-1993). Este valor é apresentado na Tabela 5-11. Os parâmetros indicados representam:

- precipitação (P), em valores médios mensais;
- evaporação ou evapotranspiração potencial (EP), em valores médios mensais;
- escoamento superficial ($ES = C' \cdot P$), obtidos aplicando-se o coeficiente ($C' = \alpha \cdot C$) relativo as médias mensais de precipitação;
- Infiltração ($I = P - ES$), referente à valores médios de infiltração;
- diferença entre as quantidades de água infiltrada e evaporada (ou evapotranspirada) ($I - EP$);
- perda potencial de água acumulada, $\Sigma_{neg}(I - EP)$, referente à soma mensal dos valores negativos de ($I - P$);
- Armazenamento de água no solo (AS), capacidade de campo para valores iniciais;
- troca de armazenamento de água no solo (ΔAS), representativo da variação da quantidade de água armazenada no solo, mês a mês;
- evaporação (evapotranspiração) real, $ER = EP + [(I - EP) - \Delta AS]$, que é a quantidade real de perda de água durante dado mês;
- percolação ($PER = P - ES - \Delta AS - ER$);

- vazão mensal que percola a camada de cobertura, $Q_m = \frac{PER \cdot A_{cont}}{2.592.000}$, em que A_{cont} = área de contribuição da seção considerada.

Tabela 5-11: Balanço hídrico da camada de cobertura para o aterro sanitário considerado.

Parâmetro (mm)	Meses												Anual
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
EP	121	110	110	82	61	50	48	64	76	93	103	115	1.033
P	208,4	198,5	145,9	74	66,4	53,8	28,4	48,8	80,2	114,6	117,5	193,1	1.330
C'	0,1	0,1	0,1	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,1	0,1	0,1	
ES	20,84	19,85	14,59	5,92	5,312	4,304	2,272	3,904	6,416	11,46	11,75	19,31	126
I	187,6	178,7	131,3	68,1	61,1	49,5	26,1	44,9	73,8	103,1	105,8	173,8	1.204
I-EP	67	69	21,3	(14)	0	(1)	(22)	(19)	(2)	10	3	59	171
ΣNEG(I-EP)	-	-	-	(13,9)	-	(0,5)	(22,4)	(41,5)	(43,7)	-	-	-	
AS	97,0	97,0	97,0	84,3	97,0	96,5	77,4	63,8	62,4	97,0	97,0	97,0	
ΔAS	-	-	-	(12,7)	12,7	(0,5)	(19,1)	(13,6)	(1,4)	34,6	-	-	
ER	121,0	110,0	110,0	80,8	61,0	50,0	45,3	58,5	75,2	93,0	103,0	115,0	1.023
PER	66,6	68,7	21,3	-	-	-	-	-	-	-	2,8	58,8	218

(-) representa valor negativo.

A partir dos dados de percolado dado em mm, obtém-se o volume mensal correspondente multiplicando-se pela área efetivamente ocupada pelo aterro. Isto pode ser feito conhecendo-se as áreas ocupadas pelas respectivas células. Quando existe sobreposição de camadas acrescenta-se somente o valor correspondente ao incremento da área projetada no plano horizontal. Os volumes mensais de percolados correspondentes a área exposta de aterro e as respectivas células ocupadas são mostrados na Tabela 5-12.

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 5-12 tem-se que durante toda a vida útil do aterro considerado, serão gerados aproximadamente 400.594 m³ de chorume, portanto considerando-se o exposto no item anterior, ou seja, da demanda de aproximadamente 365.110 m³ de solo para a cobertura dos resíduos, tem-se uma relação de 0,91 m³ de solo para cada m³ de chorume gerado.

Ressalta-se que calculando esta relação para um aterro de menor porte, também considerando um projeto real de um aterro sanitário de uma cidade do interior de São Paulo, com uma população inicial de 31.300 habitantes, chegou-se à relação de 0,89 m³ de solo para cada m³ de chorume gerado, portanto considerou-se que esta relação não deve sofrer grandes variações.

Tabela 5-12: Volume de percolado (chorume) gerado pelo aterro ao longo da vida útil. Estimativa com base nos valores médios mensais dos últimos dez anos.

Ano	Área Exposta (m ²)	Volumes Mensais (m ³)												Anual	
		Meses													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
2003	31.759	591	609	189	-	-	-	-	-	-	-	-	87	1.867	3.343
2004	47.974	2.114	2.180	677	-	-	-	-	-	-	-	-	132	2.820	7.923
2005	71.966	3.193	3.293	1.022	-	-	-	-	-	-	-	-	198	4.231	11.938
2006	71.966	4.790	4.940	1.534	-	-	-	-	-	-	-	-	198	4.231	15.693
2007	92.487	4.790	4.940	1.971	-	-	-	-	-	-	-	-	254	5.437	17.393
2008	92.487	6.156	6.349	1.971	-	-	-	-	-	-	-	-	254	5.437	20.168
2009	92.487	6.156	6.349	1.971	-	-	-	-	-	-	-	-	254	5.437	20.168
2010	116.459	6.156	6.349	1.971	-	-	-	-	-	-	-	-	320	6.847	21.643
2011	137.661	7.752	7.995	2.934	-	-	-	-	-	-	-	-	379	8.093	27.152
2012	157.339	9.163	9.450	2.934	-	-	-	-	-	-	-	-	433	9.250	31.229
2013	157.339	10.472	10.801	3.353	-	-	-	-	-	-	-	-	433	9.250	34.309
2014	171.110	10.472	10.801	3.646	-	-	-	-	-	-	-	-	471	10.060	35.450
2015	178.007	11.389	11.747	3.646	-	-	-	-	-	-	-	-	490	10.465	37.737
2016	178.007	11.848	12.220	3.793	-	-	-	-	-	-	-	-	490	10.465	38.816
2017	178.007	11.848	12.220	3.793	-	-	-	-	-	-	-	-	490	10.465	38.816
2018	178.007	11.848	12.220	3.793	-	-	-	-	-	-	-	-	490	10.465	38.816

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dos resultados da primeira etapa da segunda campanha de ensaios, na qual utilizou-se um chorume com características de um aterro antigo, pôde-se observar que, baseando-se nos

resultados obtidos para a remoção de matéria orgânica e no abastecimento equivalente à 304,5 litros de chorume por metros cúbico de solo, obteve-se uma eficiência média de remoção de DQO acima de 90%, ou ainda, aplicando-se uma carga de 0,67 gDQO/KgSoloSeco tem-se retida uma carga de 0,59 gDQO/KgSoloSeco.

Baseando-se nos dados apresentados pode-se estimar que para tratar 1 m³ de chorume com uma eficiência de remoção de DQO média, acima de 90%, utilizando-se solo compactado à uma densidade de 1,3 t/m³, são necessários 3,3 m³ de solo.

Avaliando-se a possibilidade de implantação de um sistema de tratamento composto somente de leitos de percolação utilizando o solo, previamente a cobertura do aterro, considerando que a demanda de solo para a cobertura dos resíduos é estimada em 20% do volume de resíduos disposto, tem-se que, hipoteticamente, em um aterro que recebe 50 t/dia de resíduos, ou o equivalente em volume de 100 m³/dia, o mesmo teria como demanda de solo para cobertura, aproximadamente 20 m³, o que daria para tratar, à uma média de 90% de eficiência de remoção de DQO, um volume estimado de 6 m³ de chorume.

Considerando que o processo é dinâmico (sazonalidade, qualidade, quantidade, etc.), em determinadas épocas a quantidade de solo poderia ser suficiente para tratar todo o chorume gerado com uma eficiência satisfatória em termos legais, com relação à remoção de matéria orgânica.

Conforme demonstrado no item 5.4, e observando-se os dois projetos de aterros sanitários, verifica-se que segundo as estimativas de demanda de solo para cobertura dos resíduos e de chorume gerado ao longo da vida útil do aterro, pode-se observar uma relação em torno de 0,90 m³ de solo para 1 m³ de chorume.

Ressalta-se que em alguns períodos poder haver proporcionalmente mais chorume que solo disponível para tratar com eficiência não significa que o processo não seja viável. Portanto, o gerenciamento do chorume não se pode basear somente em um sistema de tratamento e/ou destinação final, justamente por suas características dinâmicas, portanto este processo de infiltração não deve ser encarado como processo único de tratamento. Observa-se a necessidade de associar outras alternativas convencionais, conseqüentemente com porte mais reduzido, que resultariam em sistemas mais compactos e econômicos. Isto demonstra o grande potencial que é o uso do solo como elemento de tratamento ou pré-tratamento de chorume.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, observa-se grande potencial para aplicação desta alternativa para o tratamento do chorume considerado, apresentando remoções sistemáticas de DQO acima de 90%, antes que se observe a saturação do solo com a matéria orgânica, a qual ocorreu com a aplicação de cerca de 300 litros de chorume por quilo de solo, obtendo-se a remoção de 0,59 g.DQO/kg.SoloSeco. Este parâmetro, porém não pode ser considerado unicamente para o projeto do sistema ou para o gerenciamento do chorume.

Obteve-se remoção média de aproximadamente 60% de Sólidos Totais, o que acarretou em resultados significativos de redução de Cor e Turbidez. Observa-se também que a intermitência na alimentação, para os valores estudados, não influenciou significativamente a resposta do sistema. Porém, quanto a remoção de metais pesado, devido ao número reduzido de ensaios, não foi possível fazer uma avaliação mais criteriosa desta eficiência.

Foi observado que a taxa de aplicação hidráulica não influencia significativamente nos resultados obtidos, uma vez que a saturação do solo ocorreu em função do volume aplicado, independentemente do tempo em que este foi introduzido. Porém, verificou-se que a compactação do solo tem influência direta nos resultados, uma vez que em solos com densidade maior a velocidade de escoamento é mais baixa, obtendo-se melhores resultados em termos de eficiência. Por outro lado, a colmatação é mais rápida, prejudicando a percolação do efluente e comprometendo o sistema. Conclui-se, portanto, que o principal mecanismo neste sistema de tratamento, é a ação física do solo na retenção de material particulado, respondendo assim por grande parcela da eficiência observada.

O solo, depois de utilizado no sistema como elemento filtrante do chorume, quando submetido a percolação com água, simulando-se o seu uso na cobertura do aterro, reteve parcialmente os contaminantes, observando-se que, parte destes são facilmente solubilizados, gerando inicialmente um efluente com alta carga orgânica.

As simulações, baseadas em dois projetos de aterros sanitários para municípios de 32.000 e 200.000 habitantes, indicaram respectivamente, uma demanda média entre 0,89 e 0,91 m³ de solo para cada m³ de chorume gerado.

Apesar da capacidade limitada das colunas, deve ser lembrado que a proposição está embasada na rotatividade do solo a ser empregado primeiramente no tratamento do chorume e posteriormente na cobertura diária dos resíduos no aterro sanitário, cuja demanda de terra é bastante significativa, porém não o suficiente para assegurar o tratamento de todo o chorume gerado, com eficiência, durante toda a vida útil do aterro, devendo-se, portanto buscar outras alternativas para o gerenciamento adequado do chorume, como por exemplo, tratamentos biológicos complementares. Neste caso, devido a redução significativa da carga orgânica no leito percolador, o porte do sistema complementar seria reduzido, trazendo grande economia e eficiência significativa ao sistema.

7 SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE

Como principal sugestão para continuidade desse trabalho ressalta-se que devem ser efetuados maiores estudos, envolvendo mais parâmetros, avaliando-se, por exemplo, mais criteriosamente, a eficiência do sistema para a remoção de metais. Recomenda-se ainda a execução de ensaios que envolvam o tratamento do efluente das colunas, comparando-os com o tratamento do chorume bruto.

Para que se possa avaliar a viabilidade operacional do sistema sugere-se a aplicação do processo em um sistema piloto, ou mesmo em escala real, testando inclusive a aplicação com sistemas complementares, como por exemplo os alagados construídos.

Quanto ao entendimento da parte físico-química, sugere-se que sejam efetuados estudos para compreender melhor os mecanismos de retenção de contaminantes, e ainda, que seja efetuada a correlação entre os parâmetros analisados.

E finalmente sugere-se a realização de estudos visando estabelecer como, de fato, se dá o escoamento no interior das colunas, verificando a ocorrência de caminhos preferenciais, o arraste de finos e a “saturação” com contaminantes.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agnelli, N., 1997. Comportamento de um Solo Colapsível Inundado com Líquidos de Diferentes Composições Químicas. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos.
2. Bagchi, A., Design, Constrution, and Monitoring of Landfills. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-30681-9. 361 p. 1994.
3. Beard, V. e McCarty, P.L. - Anaerobic Treatment of Leachate from the Moutain View Landfill. Environmental Engineering and Science - Department of Civil Engineering Stanford University. CA, 1983.
4. Bernardes, R.S. Estabilização de Poluentes por Disposição no Solo. Dissertação de Mestrado. 1896, 100 p. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
5. Bidone, F.R.A., Povinelli, J., (1999). Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos. Publicação EESC-USP, São Carlos, SP, p.17-18.
6. Borges, A.F., Campos, T.A., Nobre, M.M.M., Desenvolvimento de um Sistema de Permeâmetros para Ensaio de Transporte de Contaminantes em Laboratório. Solos e Rochas. ABMS/ABGE, São Paulo, Vol. 20(3), p. 191-207. 1997.
7. Boscov, M. E. G., Contribuição ao projeto de contenção de resíduos perigosos utilizando solos lateríticos. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 269 p. 1997.
8. Boscov, M. E. G.; Oliveira, E.; Ghilardi, M. P. & Silva, M. M., Difusão de metais através de uma argila laterítica compactada. In: REGEO'99, 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, p. 323-330. 1999.

9. Calças, D. A. N. Q. P. Atenuação da Carga Orgânica do Chorume de Aterro Sanitário em Solos Arenosos Compactados. Dissertação de Mestrado. 2001, 144 p. Faculdade de Engenharia de Bauru. UNESP - SP.
10. CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem. Organização não Governamental. 2002. em: www.cempre.org.br.
11. CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. Inventário de Resíduos Sólidos Domiciliares: Relatório de 2002. Arquivo digital obtido em <http://www.cetesb.sp.gov.br>. 33p. São Paulo. 2002.
12. Chandler, J.A., et al., Predicting Methane Formation Biodegradability. Biotechnology and Bioengineering Symposium. Vol. 10, pp. 93-107. 1980.
13. Chian, E. S. K., and DeWalle, F. B., Characterization and Treatment of Leachate Generated from Landfill. Symp. ASChE Symposium Series. Vol 71 p 319-327. 1975.
14. Cintra, F.H., Hamada, J., Castilho Filho, G.S., Fatores que Afetam a Qualidade do Chorume Gerado em Aterro Controlado de Resíduos Sólidos Urbanos. In: VI Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental., Vitória, 2002.
15. CONDER – BA, Plano diretor de limpeza urbana da área central de Salvador – BA. 1992.
16. Costa, H. R., Estudo da Disposição de Metais Pesados no solo – Aspectos Construtivos e Casos Históricos. in: Anais do Simpósio de Barragens de Resíduos Industriais e de Mineração. Rio de Janeiro, Brasil, p. 293-319. 1987.
17. Dass, P., G.R. Tamke and C.M. Stoffel. “Leachate Production at Sanitary Landfill Sites”, Journal of the Environmental Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 103(E6):981-989. 1977.
18. Deviny, J.S., Everett, L.G., Lu, J.C.S., Stollar, R.L., Subsurface Migration of Hazardous Wastes. NY Van Nostrand Reinhold. 1990.
19. Ehrig, H.J., Prediction of Gas Production from Laboratory Scale Tests. in: Third International Landfill Symposium. Sardinia. p 87-114. 1991.
20. Fenn, D.G., K.J. Hanley and T.V. DeGeare. Use of the water balance method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites, US-EPA, SW-168. 1975.

21. Ferreira, S.B., Ensaios Laboratoriais para Avaliação do Potencial de Contaminação de Solo e de Água por Gasolina Oxigenada. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – USP. 2000.
22. Forgie, D., Selection of the Most Appropriate Leachate Treatment Methods. Part 1 A Review of Potential Biological Leachate Treatment Methods. *Water Pollution Research in Canada* 23:308-328. 1988.
23. Hamada, J., Efeitos do escoamento de chorume de aterro sanitário em solos arenosos recompactados, Relatório Final de Pesquisa - Processo Fapesp 99/09766-7, 2001.
24. Hamada, J., Castilho Filho, G.S., Faria, S., Cintra, F.H., Aplicabilidade de processos físico e físico-químico no tratamento do chorume de aterros sanitários. In: VI Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2002, Vitória, Brasil.
25. Knox, K., Leachate Treatment with Nitrification of Ammonia. *Water Research*. Vol 19, p 895-904, 1985.
26. Korfiatis, G.P., A.C. Demetracopoulos, E.L. Bourodimos and E.G. Nawy. Moisture Transport in a Solid Waste Column, *Journal of Environmental Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, 105(E2) p. 780-796. 1984.
27. Leite, J. C., Metodologia para Elaboração da Carta de Susceptibilidade à Contaminação e Poluição das Águas Subsuperficiais. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, SP. 2000.
28. Lema, J.M., Mendez, R. & Blazquez, R. - Characteristics of Landfill Lechates and Alternatives for their Treatment: A Review. *Water, Air, and Soil Pollution*. Vol. 40, p 223-250. 1988.
29. Lu, J.C.S., R.D. MORRISON and R.J. STEARNS. 1981. “Leachate Production and Management from Municipal Landfills: Summary and Assessment”, in *Land Disposal of Municipal Solid Waste*, 7th Annual Res. Symp., EPA-600/9-81/002a, D.W. SHULTZ, ed., Cincinnati, OH, U.S. Environmental Protection Agency, pp. 1-17.
30. Lu, J.C.S., R.D. Morrison and R.J. Stearns. Leachate Production and Management from Municipal Landfills: Summary and Assessment, in: *Land Disposal of Municipal Solid Waste*, 7th Annual Res. Symp., US-EPA-600/9-81/002a, D.W. SHULTZ, ed., Cincinnati, OH, U.S. Environmental Protection Agency, pp. 1-17. 1984.

31. Metcalf & Eddy., Inc., Wasterwater Engineering – Treatment Disposal Reuse. McGraw-Hill International Editions,,1991.Third Edition,1334 pages. 1991.
32. McBean, E.A., Rovers, F.A., Farquhar, G.J., (1995) Solid Waste Landfill Engineering and Design. Prentice Hall, Inc. p. 521, ISBN 0-13-079187-3.
33. Mondelli, G, Rodrigues, A., (2001). Relatório de Ensaios de Caracterização da Disciplina de Ensaios Especiais em Solo. Universidade Estadual Paulista. Bauru.
34. NBR 6459 - Solo - Determinação do limite de liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 6 p. 1984.
35. NBR 7180 - Solo - Determinação do limite de plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 3 p. 1984.
36. NBR 7181 – Solo - Análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 13 p. 1984.
37. NBR 10.004 - Resíduos sólidos – Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 71 p. 2004.
38. NBR 10.006 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 3 p. 2004.
39. Overman, A. R.; McMahon, B. R.; Chu, R. L. e Wang, F. C., Cation transport in packed bed reator of soil. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 106(EE2): 267-277. 1980.
40. Paganini, W. da Silva, Disposição de Esgotos no solo (Escoamento à superfície) – Fundo Editorial da AESABESP – São Paulo, SP. 232 p. 1997.
41. Pessin, N., Mandelli, S.M.C., Slompo,M., Determinação da Composição Física e das Características Físico-Químicas dos Resíduos Sólidos Domésticos da Cidade de Caxias do Sul. in: Tratamento de resíduos sólidos: compêndio de publicações. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS. 291 p. 1991.
42. Pinto, D.M.D.L., Baldochi, V.M.Z., Povinelli, J., 2000. Procedimento para Elaboração de Resíduo Urbano Doméstico Padrão. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES. pp. 25-31. Vol. 5, nº 1 e 2.
43. Qasim, S.R., Sanitary Landfill Leachate – Generation, Control and Treatment. Technomic Pub. Co. Inc. 339 p, 1994. ISBN 1-56676-129-8.

44. Qasim, S.R., Burchinal, L.C., Leaching from Simulated Landfills. Journal of the Water Pollution Control Federation. Vol 42, pp 371-379, 1970.
45. Reitzel, S, Farquhar, G., McBean, E., Temporal Characterization of Municipal Solid Waste Leachate. Canadian Journal of Civil Engineering. Aug. 1992.
46. Remson, I., A.A. Fungaroli and A.W. Lawrence. Water Movement in an Unsaturated Sanitary Landfill. Journal of the Sanitary Engineering Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 94(SA2) p. 307-317. 1968.
47. Rice, R.C., Soil Clogging during Infiltration of Secondary Effluent. Journal of Water Pollution Control Federation. n°. 46, p. 708-716. 1974.
48. Ritter, E., Ehrlich, M., Barbosa, M.C., Difusão e Sorção de Soluções Múltiplas e Monosoluções em Solos Argilosos Salinos e não Salinos. In anais: REGEO'99 – 4º Congresso Brasileiro de Geologia Ambiental. S.J. Campos, SP. p 331-338. 1999.
49. Robinson, H.D., Maris, P.J., Leachate from Domestic Waste: Generation, Composition and Treatment: A Review. Water Research Center Technical Report TR108. Medmenham Laboratory, England, March. 1979.
50. Salvato, J.A., Environmental Engineering and Sanitation. 4th edition, Wiley-Interscience, New York.. 1992.
51. Sharma, H.D., Lewis, S.P., Waste Containment Systems, Waste Stabilization, and Landfills: Design and Evaluation. John Wiley & Sons, Inc. 588 p. ISBN 0-471-57536-4. 1994.
52. Swami, M.V. e Mattos, A. Hidrologia Aplicada. São Paulo-SP: McGraw-Hill do Brasil, 245 p. 1978.
53. Tchobanoglous, G., Theisen, H., Virgil, S., Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill, Inc., International Edition. 978 p. 1993. ISBN 0-07-063237-5.
54. White, P.R., Franke, M., Hindle, P., Integrated Solid Waste Management: A Lifecycle Inventory. Blackie Academics & Professional (imprint of Chapman & Hall). ISBN 0-7514-0046-7. 362 p. 1993.
55. Zuquette, L.V., Pejon, O.J, Paraguassu, A.B., Gandolfi, N., Características Básicas Apresentadas Pelos Materiais Inconsolidados Residuais Arenosos da Formação Botucatu

Quando Percolados por Soluções Enriquecidas com as Espécies Químicas K^+ , Na^+ , Cu^{2+} , Zn^{2+} e Cl^- . *Geociências*, Vol. 14 (2), p. 133-144. 1995.

56. Zuquette, L.V., Pejon, O.J., Rodrigues, J.E., Paraguassú, A.B., Gandolfi, N., Solute Breakthrough Curves (Na, Cu, Zn and Cd) for Sandy Unconsolidated material from Botucatu Formation of São Paulo State. In anais: International Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics. Rio de Janeiro, Vol. 1. p. 459-464. 1997.
57. Zuquette, L.V., Pejon, O.J., Sinelli, O., Estudos Geotécnicos Preliminares dos Materiais Inconsolidados que Constituem a Base de Lagoas para a Disposição de Águas de Lavagem. In: anais do 7º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. Belo Horizonte, p. 188-198. 1992.

9 ANEXOS

Em complementação aos resultados apresentados no capítulo 5 desta dissertação, são apresentados a seguir, detalhadamente, os resultados obtidos durante as três campanhas de ensaios realizadas, expressos através de tabelas.

8.1 PRIMEIRA CAMPANHA DE ENSAIOS

Para a primeira campanha de ensaios, adotou-se duas colunas em condições saturadas com densidades de 1,15 e 1,30, e 4 colunas em condições não saturadas com densidades de 1,15; 1,30; 1,50 e 1,67, alimentando-as com um volume de 1 litro de chorume por semana ao longo de 4 semanas, isto representa uma taxa concentrada de $0,135 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{SoloSeco.dia}$ ou uma taxa média diária de $0,0193 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{SoloSeco.dia}$ ao longo de uma semana, sendo avaliado os parâmetros DQO, Sólidos Totais, pH, Condutividade, Cor e Turbidez, cujos os resultados são apresentados abaixo

Ressalta-se que se utilizou nos cálculos da eficiência e da carga removida, a DQO média do chorume, ou seja, 5.670 mg/l , obtida com a realização de ensaios periódicos durante toda a campanha.

Conforme pode ser observado, para as colunas com densidades de 1,15 e 1,30 em condições saturadas, houve um intervalo de tempo maior entre o primeiro abastecimento e a primeira coleta, devido ao volume necessário de chorume para o preenchimento dos vazios do solo, até que se atingisse saturação do mesmo, obtendo-se assim condições para a coleta de efluente.

Ressalta-se a dificuldade de avaliação dos resultados apresentados, face ao baixo volume coletado para estas colunas, comparativamente ao volume aplicado.

Na Tabela 9-1, encontram-se descritos os resultados das análises de DQO do efluente e os resultados dos cálculos pertinentes à avaliação e discussão sobre este parâmetro.

Tabela 9-1: Resumo dos valores referentes DQO na primeira campanha de ensaios

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic.Equiv. (Litros de chorume/m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	DQO retida (mg)	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 1 d = 1,15 (sat.)	01/11/2003	1.000	135,3	6.830	0,67						
	08/11/2003	2.000	270,6	6.830	1,33						
	14/11/2003	3.000	406,0	4.510	2,00	70	1.870	67	266	0,03	0,03
	22/11/2003	4.000	541,3	4.510	2,67	250	3.065	46	469	0,06	0,09
Coluna 2 d = 1,30 (sat.)	01/11/2003	1.000	135,3	6.830	0,59						
	08/11/2003	2.000	270,6	6.830	1,18	580	71	99	3.247	0,34	0,34
	14/11/2003	3.000	406,0	4.510	1,77	650	172	97	385	0,04	0,38
	22/11/2003	4.000	541,3	4.510	2,36	830	660	88	902	0,09	0,47
Coluna 3 d = 1,15	01/11/2003	1.000	135,3	6.830	0,67	180	457	92	938	0,11	0,11
	08/11/2003	2.000	270,6	6.830	1,33	1.130	408	93	4.999	0,59	0,70
	14/11/2003	3.000	406,0	4.510	2,00	2.120	2.830	50	2.812	0,33	1,03
	22/11/2003	4.000	541,3	4.510	2,67	3.105	3.820	33	1.822	0,21	1,24
Coluna 4 d = 1,30	01/11/2003	1.000	135,3	6.830	0,59	334	257	95	1.808	0,19	0,19
	08/11/2003	2.000	270,6	6.830	1,18	1.279	230	96	5.141	0,54	0,72
	14/11/2003	3.000	406,0	4.510	1,77	2.274	2.560	55	3.094	0,32	1,05
	22/11/2003	4.000	541,3	4.510	2,36	3.259	2.960	48	2.669	0,28	1,32
Coluna 5 d = 1,50	01/11/2003	1.000	135,3	6.830	0,51	118	891	84	564	0,05	0,05
	08/11/2003	2.000	270,6	6.830	1,02	1.043	132	98	5.123	0,46	0,51
	14/11/2003	3.000	406,0	4.510	1,53	2.013	1.463	74	4.081	0,37	0,88
	22/11/2003	4.000	541,3	4.510	2,05	2.983	3.500	38	2.105	0,19	1,07
Coluna 6 d = 1,67	01/11/2003	1.000	135,3	6.830	0,46	446	222	96	2.430	0,20	0,20
	08/11/2003	2.000	270,6	6.830	0,92	1.396	93	98	5.298	0,43	0,63
	14/11/2003	3.000	406,0	4.510	1,38	2.311	711	87	4.537	0,37	0,99
	22/11/2003	4.000	541,3	4.510	1,84	3.306	1.980	65	3.672	0,30	1,29

A partir da Tabela 9-2 à Tabela 9-6, são apresentados os valores obtidos para os ensaios de pH, Condutividade, Cor, Turbidez e Sólidos Totais. O pH do chorume, no período de realização dos ensaios variou de 7,97 à 9,06. A Condutividade do chorume, no período de realização dos ensaios variou de 6.140,0 à 10.700,0 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ($T=32^{\circ}\text{C}$). Ressalta-se que no período não foi efetuado o ensaio para determinação dos valores de Cor e Turbidez para o chorume utilizado no abastecimento das colunas, nesta primeira companhia de ensaios. A média de Sólidos Totais do chorume, no período de realização dos ensaios foi de 12.270 mg/l.

Tabela 9-2: Valores do pH para as amostras coletadas dos efluentes das colunas.

Dia	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
01/11/2003			7,19	7,26	7,30	7,50
08/11/2003		7,08	4,80	5,85	7,44	7,37
14/11/2003	4,40	6,39	7,42	7,63	6,91	3,93
22/11/2003	8,10	3,98	7,84	8,00	7,91	8,27

Tabela 9-3: Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^{\circ}\text{C}$, para as amostras coletadas dos efluentes das colunas.

Dia	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
01/11/2003			329	148	160	170
08/11/2003		264	2.060	2.010	579	333
14/11/2003	3.730	381	9.310	9.440	8.010	5.880
22/11/2003	11.610	5.190	16.590	15.450	14.800	12.180

Tabela 9-4: Valores de Cor (UC*) para as amostras coletadas dos efluentes das colunas.

Dia	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
01/11/2003			134	26	88	27
08/11/2003		31	20	14	8	1
14/11/2003	1420	64	2290	2440	1450	25
22/11/2003	2620	610	2140	1990	2530	2900

* UC: Padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart

Tabela 9-5: Valores de Turbidez (UT*) para as amostras coletadas dos efluentes das colunas.

Dia	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
01/11/2003			36	7	16	7
08/11/2003		9	5	4	4	3
14/11/2003	213	14	226	262	214	8
22/11/2003	188	49	98	132	157	188

* UT: Unidade FAU - Formazin Attenuation Units.

Tabela 9-6: Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l), para as amostras coletadas dos efluentes das colunas.

Dia	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
01/11/2003			98,7	98,5	99,0	99,4
08/11/2003		98,1	80,6	82,8	96,2	98,0
14/11/2003	64,2	96,1	30,9	41,0	30,8	39,0
22/11/2003	30,1	49,8	23,2	28,7	29,5	24,5

8.2 SEGUNDA CAMPANHA DE ENSAIOS

Para a segunda campanha de ensaios, adotou-se as mesmas condições de compactação da primeira etapa, ou seja, duas colunas em condições saturadas com densidades de 1,15 e 1,30, e 4 colunas em condições não saturadas com densidades de 1,15; 1,30; 1,50 e 1,67, alimentando-as com um volume de 0,250 litro de chorume por dia, de segunda à sexta-feira, o que representa uma taxa concentrada diária de $0,034 \text{ m}^3 \text{ chorume} / \text{m}^3 \text{ SoloSeco}$, sendo avaliados os parâmetros DQO, sólidos totais, pH, condutividade, cor e turbidez.

Esta segunda campanha dividiu-se em 3 etapas, cujos resultados são apresentados e discutidos à seguir.

Primeira Etapa

Esta primeira etapa ocorreu no período de 05/12/2003 à 13/01/2004, quando foi efetuado o abastecimento com chorume por 18 (dezoito) vezes em (quarenta) dias

consecutivos, ressaltando-se que houve uma paralisação na alimentação e nos ensaios, no período de 20/12/2003 à 06/01/2004.

Destaca-se que as características das colunas de percolação nesta etapa, foram iguais à da primeira campanha de ensaios, as quais encontram-se especificadas na Tabela 5-1.

Na Tabela 9-7 à Tabela 9-12, encontram-se descritos os resultados das análises de DQO do efluente e os resultados dos cálculos pertinentes à avaliação e discussão sobre este parâmetro.

Ressalta-se que se utilizou nos cálculos da eficiência e da carga removida, a DQO média do chorume, ou seja, 2.869 mg/l, obtida com a realização de ensaios periódicos durante toda a campanha.

Na Tabela 9-7 e na Tabela 9-8, referentes as colunas com densidades de 1,15 e 1,30, respectivamente, em condições saturadas, nota-se que houve um intervalo de tempo maior entre o primeiro abastecimento e a primeira coleta, aproximadamente 14 dias, devido ao volume necessário de chorume para o preenchimento dos vazios do solo, até que se atingisse saturação do mesmo, obtendo-se assim condições para a coleta de efluente. Porém para a coluna com densidade de 1,30, houve no décimo segundo dia, uma coleta anômala, devido a uma falha operacional do sistema, o qual promoveu a sucção do efluente, o que foi prontamente sanado, dando continuidade ao ensaio.

Tabela 9-7: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (1ª etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 1, com densidade igual a 1,15, em condições saturadas.

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic. Equiv. (Litros de chorume /m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 1 d = 1,15 (sat.)	05/12/2003	250	33,8	2.900,0	0,08	0,08					
	06/12/2003	500	67,7	2.910,0	0,08	0,17					
	09/12/2003	750	101,5	2.920,0	0,08	0,25					
	10/12/2003	1.000	135,3	2.610,0	0,08	0,34					
	11/12/2003	1.250	169,2	2.130,0	0,08	0,42					
	12/12/2003	1.500	203,0	2.840,0	0,08	0,51					
	13/12/2003	1.750	236,8	3.010,0	0,08	0,59					
	16/12/2003	2.000	270,6	3.000,0	0,08	0,68					
	17/12/2003	2.250	304,5	2.990,0	0,08	0,76					
	18/12/2003	2.500	338,3	3.070,0	0,08	0,84	10	652	77	0,003	0,003
	19/12/2003	2.750	372,1	2.990,0	0,08	0,93	10	574	80	0,003	0,005
	20/12/2003	3.000	406,0	2.990,0	0,08	1,01	326	391	86	0,095	0,100
	06/01/2004	3.250	439,8	2.800,0	0,08	1,10	136	283	90	0,041	0,142
	07/01/2004	3.500	473,6	2.800,0	0,08	1,18	160	1.280	55	0,030	0,172
	08/01/2004	3.750	507,5	2.900,0	0,08	1,27	254	1.050	63	0,054	0,226
	09/01/2004	4.000	541,3	2.960,0	0,08	1,35	238	1.200	58	0,047	0,273
10/01/2004	4.250	575,1	2.950,0	0,08	1,43	325	1.310	54	0,060	0,332	
13/01/2004	4.500	608,9			0,08	1,52	280	940	67	0,064	0,396

Tabela 9-8: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (1ª etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 2, com densidade igual a 1,30, em condições saturadas.

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic. Equiv. (Litros de chorume /m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 2 d = 1,30 (sat.)	05/12/2003	250	33,8	2.900,0	0,07	0,07	-				
	06/12/2003	500	67,7	2.910,0	0,07	0,15	-				
	09/12/2003	750	101,5	2.920,0	0,07	0,22	-				
	10/12/2003	1.000	135,3	2.610,0	0,07	0,30	-				
	11/12/2003	1.250	169,2	2.130,0	0,07	0,37	-				
	12/12/2003	1.500	203,0	2.840,0	0,07	0,45	-				
	13/12/2003	1.750	236,8	3.010,0	0,07	0,52	-				
	16/12/2003	2.000	270,6	3.000,0	0,07	0,60	615	150	95	0,174	0,174
	17/12/2003	2.250	304,5	2.990,0	0,07	0,67					
	18/12/2003	2.500	338,3	3.070,0	0,07	0,75	625	138	95	0,003	0,177
	19/12/2003	2.750	372,1	2.990,0	0,07	0,82	635	185	94	0,003	0,180
	20/12/2003	3.000	406,0	2.990,0	0,07	0,90	849	337	88	0,056	0,236
	06/01/2004	3.250	439,8	2.800,0	0,07	0,97	915	184	94	0,018	0,255
	07/01/2004	3.500	473,6	2.800,0	0,07	1,05	1.121	940	67	0,041	0,296
	08/01/2004	3.750	507,5	2.900,0	0,07	1,12	1.503	350	88	0,100	0,396
09/01/2004	4.000	541,3	2.960,0	0,07	1,19	1.683	550	81	0,043	0,439	
10/01/2004	4.250	575,1	2.950,0	0,07	1,27	2.123	1.040	64	0,084	0,523	
13/01/2004	4.500	608,9			0,07	1,34	2.373	1.880	34	0,026	0,549

Tabela 9-9: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (1ª etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 3, com densidade igual a 1,15.

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic. Equiv. (Litros de chorume /m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 3 d = 1,15	05/12/2003	250	33,8	2.900,0	0,08	0,08	145	123	96	0,05	0,05
	06/12/2003	500	67,7	2.910,0	0,08	0,17	380	124	96	0,08	0,12
	09/12/2003	750	101,5	2.920,0	0,08	0,25	655	72	97	0,09	0,21
	10/12/2003	1.000	135,3	2.610,0	0,08	0,34	820	68	98	0,05	0,27
	11/12/2003	1.250	169,2	2.130,0	0,08	0,42	1.072	61	98	0,08	0,35
	12/12/2003	1.500	203,0	2.840,0	0,08	0,51	1.317	102	96	0,08	0,43
	13/12/2003	1.750	236,8	3.010,0	0,08	0,59	1.487	146	95	0,05	0,49
	16/12/2003	2.000	270,6	3.000,0	0,08	0,68	1.847	253	91	0,11	0,60
	17/12/2003	2.250	304,5	2.990,0	0,08	0,76	2.047	1.830	36	0,02	0,62
	18/12/2003	2.500	338,3	3.070,0	0,08	0,84	2.237	1.800	37	0,02	0,64
	19/12/2003	2.750	372,1	2.990,0	0,08	0,93	2.487	1.830	36	0,03	0,67
	20/12/2003	3.000	406,0	2.990,0	0,08	1,01	2.729	2.270	21	0,02	0,69
	06/01/2004	3.250	439,8	2.800,0	0,08	1,10	2.879	1.870	35	0,02	0,71
	07/01/2004	3.500	473,6	2.800,0	0,08	1,18	2.985	1.740	39	0,01	0,72
	08/01/2004	3.750	507,5	2.900,0	0,08	1,27	3.233	2.550	11	0,01	0,73
09/01/2004	4.000	541,3	2.960,0	0,08	1,35	3.433	2.180	24	0,02	0,75	
10/01/2004	4.250	575,1	2.950,0	0,08	1,43	3.703	2.260	21	0,02	0,77	
13/01/2004	4.500	608,9			0,08	1,52	4.093	1.770	38	0,05	0,82

Tabela 9-10: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (1ª etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 4, com densidade igual a 1,30.

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic. Equiv. (Litros de chorume /m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 4 d = 1,30	05/12/2003	250	33,8	2.900,0	0,07	0,07	170	115	96	0,05	0,05
	06/12/2003	500	67,7	2.910,0	0,07	0,15	400	94	97	0,07	0,12
	09/12/2003	750	101,5	2.920,0	0,07	0,22	695	25	99	0,09	0,20
	10/12/2003	1.000	135,3	2.610,0	0,07	0,30	875	26	99	0,05	0,26
	11/12/2003	1.250	169,2	2.130,0	0,07	0,37	1.123	54	98	0,07	0,33
	12/12/2003	1.500	203,0	2.840,0	0,07	0,45	1.341	109	96	0,06	0,39
	13/12/2003	1.750	236,8	3.010,0	0,07	0,52	1.619	155	95	0,08	0,47
	16/12/2003	2.000	270,6	3.000,0	0,07	0,60	1.919	368	87	0,08	0,55
	17/12/2003	2.250	304,5	2.990,0	0,07	0,67	2.069	387	87	0,04	0,59
	18/12/2003	2.500	338,3	3.070,0	0,07	0,75	2.319	780	73	0,05	0,64
	19/12/2003	2.750	372,1	2.990,0	0,07	0,82	2.569	1.380	52	0,04	0,68
	20/12/2003	3.000	406,0	2.990,0	0,07	0,90	2.779	2.895	(1)	(0,00)	0,68
	06/01/2004	3.250	439,8	2.800,0	0,07	0,97	2.999	2.840	1	0,00	0,68
	07/01/2004	3.500	473,6	2.800,0	0,07	1,05	3.071	3.240	(13)	(0,00)	0,68
	08/01/2004	3.750	507,5	2.900,0	0,07	1,12	3.311	2.390	17	0,01	0,69
09/01/2004	4.000	541,3	2.960,0	0,07	1,19	3.561	2.270	21	0,02	0,70	
10/01/2004	4.250	575,1	2.950,0	0,07	1,27	3.836	2.140	25	0,02	0,73	
13/01/2004	4.500	608,9			0,07	1,34	4.156	1.930	33	0,03	0,76

Tabela 9-11: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (1ª etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 5, com densidade igual a 1,50

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic. Equiv. (Litros de chorume /m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 5 d = 1,50	05/12/2003	250	33,8	2.900,0	0,06	0,06	140	84	97	0,04	0,04
	06/12/2003	500	67,7	2.910,0	0,06	0,13	365	31	99	0,06	0,09
	09/12/2003	750	101,5	2.920,0	0,06	0,19	660	19	99	0,08	0,17
	10/12/2003	1.000	135,3	2.610,0	0,06	0,26	850	23	99	0,05	0,22
	11/12/2003	1.250	169,2	2.130,0	0,06	0,32	1.094	14	100	0,06	0,28
	12/12/2003	1.500	203,0	2.840,0	0,06	0,39	1.349	48	98	0,06	0,35
	13/12/2003	1.750	236,8	3.010,0	0,06	0,45	1.584	108	96	0,06	0,40
	16/12/2003	2.000	270,6	3.000,0	0,06	0,52	1.879	160	94	0,07	0,48
	17/12/2003	2.250	304,5	2.990,0	0,06	0,58	2.079	532	81	0,04	0,52
	18/12/2003	2.500	338,3	3.070,0	0,06	0,65	2.355	645	78	0,06	0,57
	19/12/2003	2.750	372,1	2.990,0	0,06	0,71	2.599	839	71	0,04	0,62
	20/12/2003	3.000	406,0	2.990,0	0,06	0,78	2.825	1.107	61	0,04	0,65
	06/01/2004	3.250	439,8	2.800,0	0,06	0,84	2.935	2.640	8	(0,00)	0,66
	07/01/2004	3.500	473,6	2.800,0	0,06	0,91	3.011	3.190	(11)	(0,00)	0,65
	08/01/2004	3.750	507,5	2.900,0	0,06	0,97	3.251	3.770	(31)	(0,02)	0,63
	09/01/2004	4.000	541,3	2.960,0	0,06	1,04	3.473	3.260	(14)	(0,01)	0,63
10/01/2004	4.250	575,1	2.950,0	0,06	1,10	3.743	2.550	11	0,01	0,63	
13/01/2004	4.500	608,9			0,06	1,16	4.068	2.100	27	0,02	0,66

Tabela 9-12: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (1ª etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 6, com densidade igual a 1,67.

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic. Equiv. (Litros de chorume /m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 6 d = 1,67	05/12/2003	250	33,8	2.900,0	0,06	0,06	65	171	94	0,01	0,01
	06/12/2003	500	67,7	2.910,0	0,06	0,12	180	104	96	0,03	0,04
	09/12/2003	750	101,5	2.920,0	0,06	0,17	470	32	99	0,07	0,11
	10/12/2003	1.000	135,3	2.610,0	0,06	0,23	555	35	99	0,02	0,13
	11/12/2003	1.250	169,2	2.130,0	0,06	0,29	643	23	99	0,02	0,15
	12/12/2003	1.500	203,0	2.840,0	0,06	0,35	723	22	99	0,02	0,16
	13/12/2003	1.750	236,8	3.010,0	0,06	0,41	815	26	99	0,02	0,19
	16/12/2003	2.000	270,6	3.000,0	0,06	0,46	1.815	75	97	0,23	0,41
	17/12/2003	2.250	304,5	2.990,0	0,06	0,52	2.025	303	89	0,04	0,46
	18/12/2003	2.500	338,3	3.070,0	0,06	0,58	2.225	509	82	0,04	0,49
	19/12/2003	2.750	372,1	2.990,0	0,06	0,64	2.429	534	81	0,04	0,53
	20/12/2003	3.000	406,0	2.990,0	0,06	0,70	2.639	697	76	0,04	0,57
	06/01/2004	3.250	439,8	2.800,0	0,06	0,76	2.969	470	84	0,06	0,63
	07/01/2004	3.500	473,6	2.800,0	0,06	0,81	3.021	1495	48	0,01	0,64
	08/01/2004	3.750	507,5	2.900,0	0,06	0,87	3.171	4070	(42)	(0,01)	0,63
09/01/2004	4.000	541,3	2.960,0	0,06	0,93	3.333	6470	(126)	(0,05)	0,58	
10/01/2004	4.250	575,1	2.950,0	0,06	0,99	3.518	5130	(79)	(0,03)	0,54	
13/01/2004	4.500	608,9			0,06	1,05	3.738	3100	(8)	(0,00)	0,54

Na Tabela 9-13 à Tabela 9-15, são apresentados os valores obtidos para os ensaios de Cor, Turbidez e Sólidos Totais, respectivamente. Para esta primeira etapa da segunda campanha de ensaios, não sendo avaliado nesta, o pH e a Condutividade.

Tabela 9-13: Valores de Cor (UC*) para as amostras coletadas dos efluentes das colunas.

Dia	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
05/dez			32	22	101	96
06/dez			8	11	37	85
09/dez			9	6	5	8
10/dez			8	8	7	23
11/dez			15	5	4	13
12/dez			55	23	7	11
13/dez			24	22	19	21
16/dez		20	960	63	25	10
17/dez			1000	82	31	34
18/dez			890	158	85	35
19/dez			1130	1250	72	18
20/dez	52	118	1050	1600	1220	25
06/jan	59	38	1020	1640	1200	35
07/jan	990	22	1300	1040	1750	428
08/jan	610	740	770	620	1960	730
09/jan	500	280	360	390	1090	1290
10/jan	380	400	270	310	620	1530
13/jan	444	750	240	300	355	1630

* UC: Padrão relativo ao PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart

Ressalta-se que para as análises preliminares do afluente (chorume) utilizado no abastecimento das colunas nesta primeira etapa da segunda campanha de ensaios, obteve-se o valor de Cor igual à 5.200,0 PtCo, podendo-se assim afirmar que o sistema possui um boa eficiência inicial na remoção de Cor, sendo observado uma tendência de aumento dos valores, seguida de nova recuperação de eficiência.

Tabela 9-14: Valores de Turbidez (UT*) para as amostras coletadas dos efluentes das colunas.

Dia	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
05/dez			4	8	11	12
06/dez			4	5	8	10
09/dez			4	2	3	3
10/dez			4	4	4	5
11/dez			5	5	5	6
12/dez			13	9	5	6
13/dez			6	8	9	6
16/dez		6	65	9	8	5
17/dez			24	10	10	22
18/dez			35	26	9	11
19/dez			31	69	12	14
20/dez	10	21	27	39	122	10
06/jan	8	11	11	30	46	6
07/jan	69	6	35	48	118	41
08/jan	40	114	34	35	172	91
09/jan	46	21	8	21	73	77
10/jan	30	66	9	13	33	56
13/jan	36	44	7	12	10	73

* UT: Unidade FAU - Formazin Attenuation Units.

A Turbidez para o chorume utilizado no abastecimento das colunas, foi de 322,0 FAU, obtida em análises preliminares, verificando-se assim, na Tabela 9-14, que também para os valores de Turbidez, seguiu-se a tendência observada para os valores de Cor, expostos na Tabela 9-13, com baixos valores iniciais, aumentando com o tempo, seguido de nova queda.

Tabela 9-15: Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l)

Dia	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
05/dez			96,6	96,8	97,2	95,4
12/dez			53,6	70,2	95,2	96,1
16/dez		95,0	19,3	11,9	20,4	83,5
08/jan	55,1	52,1	26,1	22,7	13,6	10,6

Segunda Etapa

Conforme descrito anteriormente, esta segunda etapa da segunda campanha de ensaios ocorreu no período de 14/01/2004 à 28/02/2004, e consistiu-se em 26 (vinte e seis) abastecimentos com água, em 46 (quarenta e seis) dias, com o mesmo volume de chorume, ou

seja, 0,25 litros por abastecimento, sendo os resultados destas etapas apresentados e discutidos abaixo. Ressalta-se que houve uma paralisação no ensaio no período de 24/01/2004 à 06/02/2004.

Destaca-se que esta etapa foi uma seqüência da primeira, portanto as características das colunas de percolação, foram iguais à da primeira campanha de ensaios, as quais encontram-se especificadas na Tabela 5-1.

Na Tabela 9-16 à Tabela 9-21, encontram-se descritos os resultados das análises de DQO do efluente e os resultados dos cálculos pertinentes à avaliação e discussão sobre este parâmetro.

O objetivo desta etapa do ensaio, seria simular a utilização deste material na cobertura do aterro, após este ter sido utilizado tratamento do chorume, verificando-se assim os impactos causados pela lixiviação deste material pela ação das chuvas, no efluente gerado.

Salienta-se que foram realizadas análises de DQO da água utilizada no abastecimento, porém obtendo-se valores iguais ou muito próximos à zero, portanto considerou-se que a água utilizada era isenta de carga orgânica.

A partir da Tabela 9-22 até Tabela 9-26 são apresentados os valores obtidos para os ensaios de pH, Condutividade, Cor, Turbidez e Sólidos Totais. O pH médio da água, no período de realização dos ensaios foi igual à 8,26; o valor médio da Condutividade da água, foi igual à 112,3 $\mu\text{s}/\text{cm}$ e a média do valor de Sólidos Totais da água foi igual à 128 mg/l.

Tabela 9-16: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (2ª etapa – abastecimento com água), para a coluna 1, com densidade igual a 1,15, em condições saturadas.

	Data	Vol. Aplicado (ml)	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Equiv. (Litros de água/m ³ solo)	Vol. Coletado (ml)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	DQO removida (mg)	Carga de DQO efluente (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO efluente Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 1	14/1/2004	250	250	33,8	136,0	136	230,0	31,3	0,004	0,004
	15/1/2004	250	500	67,7	198,0	334	928,0	183,7	0,022	0,025
	16/1/2004	250	750	101,5	184,0	518	1.260,0	231,8	0,027	0,053
	17/1/2004	250	1.000	135,3	246,0	764	1.225,0	301,4	0,035	0,088
	20/1/2004	250	1.250	169,2	300,0	1.064	1.990,0	597,0	0,070	0,158
	21/1/2004	250	1.500	203,0	128,0	1.192	1.650,0	211,2	0,025	0,183
	22/1/2004	250	1.750	236,8	250,0	1.442	1.610,0	402,5	0,047	0,231
	23/1/2004	250	2.000	270,6	160,0	1.602	1.760,0	281,6	0,033	0,264
	24/1/2004	250	2.250	304,5	210,0	1.812	1.980,0	415,8	0,049	0,313
	6/2/2004	250	2.500	338,3	190,0	2.002	2.260,0	429,4	0,051	0,363
	7/2/2004	250	2.750	372,1	224,0	2.226	2.320,0	519,7	0,061	0,424
	10/2/2004	250	3.000	406,0	230,0	2.456	2.100,0	483,0	0,057	0,481
	11/2/2004	250	3.250	439,8	200,0	2.656	2.300,0	460,0	0,054	0,535
	12/2/2004	250	3.500	473,6	230,0	2.886	2.860,0	657,8	0,077	0,613
	13/2/2004	250	3.750	507,5	230,0	3.116	1.730,0	397,9	0,047	0,659
	14/2/2004	250	4.000	541,3	260,0	3.376	1.760,0	457,6	0,054	0,713
	17/2/2004	250	4.250	575,1	252,0	3.628	1.110,0	279,7	0,033	0,746
	18/2/2004	250	4.500	608,9	230,0	3.858	1.221,0	280,8	0,033	0,779
	19/2/2004	250	4.750	642,8	224,0	4.082	971,0	217,5	0,026	0,805
	20/2/2004	250	5.000	676,6	286,0	4.368	934,0	267,1	0,031	0,836
	21/2/2004	250	5.250	710,4	222,0	4.590	843,0	187,1	0,022	0,858
	24/2/2004	250	5.500	744,3	360,0	4.950	732,0	263,5	0,031	0,889
	25/2/2004	250	5.750	778,1	132,0	5.082	743,0	98,1	0,012	0,901
	26/2/2004	250	6.000	811,9	144,0	5.226	700,0	100,8	0,012	0,913
	27/2/2004	250	6.250	845,8	180,0	5.406	655,0	117,9	0,014	0,927
	28/2/2004	250	6.500	879,6	170,0	5.576	713,0	121,2	0,014	0,941

Tabela 9-17: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (2ª etapa – abastecimento com água), para a coluna 2, com densidade igual a 1,30, em condições saturadas.

	Data	Vol. Aplicado (ml)	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Equiv. (Litros de água/m3 solo)	Vol. Coletado (ml)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	DQO removida (mg)	Carga de DQO efluente (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO efluente Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 2 d = 1,30 saturada	14/1/2004	250	250	33,8	88,0	88	1.120,0	98,6	0,010	0,010
	15/1/2004	250	500	67,7	236,0	324	2.220,0	523,9	0,055	0,065
	16/1/2004	250	750	101,5	190,0	514	2.060,0	391,4	0,041	0,106
	17/1/2004	250	1.000	135,3	190,0	704	2.060,0	391,4	0,041	0,146
	20/1/2004	250	1.250	169,2	320,0	1.024	2.280,0	729,6	0,076	0,222
	21/1/2004	250	1.500	203,0	212,0	1.236	2.020,0	428,2	0,045	0,267
	22/1/2004	250	1.750	236,8	275,0	1.511	1.790,0	492,3	0,051	0,318
	23/1/2004	250	2.000	270,6	180,0	1.691	1.810,0	325,8	0,034	0,352
	24/1/2004	250	2.250	304,5	188,0	1.879	1.910,0	359,1	0,037	0,389
	6/2/2004	250	2.500	338,3	28,0	1.907	1.490,0	41,7	0,004	0,394
	7/2/2004	250	2.750	372,1	35,0	1.942	1.830,0	64,1	0,007	0,400
	10/2/2004	250	3.000	406,0	86,0	2.028	2.190,0	188,3	0,020	0,420
	11/2/2004	250	3.250	439,8	25,0	2.053	2.270,0	56,8	0,006	0,426
	12/2/2004	250	3.500	473,6	48,0	2.101	2.050,0	98,4	0,010	0,436
	13/2/2004	250	3.750	507,5	184,0	2.285	1.670,0	307,3	0,032	0,468
	14/2/2004	250	4.000	541,3	202,0	2.487	1.960,0	395,9	0,041	0,509
	17/2/2004	250	4.250	575,1	180,0	2.667	1.580,0	284,4	0,030	0,539
	18/2/2004	250	4.500	608,9	44,0	2.711	1.910,0	84,0	0,009	0,548
	19/2/2004	250	4.750	642,8	94,0	2.805	1.620,0	152,3	0,016	0,564
	20/2/2004	250	5.000	676,6	110,0	2.915	1.900,0	209,0	0,022	0,585
	21/2/2004	250	5.250	710,4	60,0	2.975	1.680,0	100,8	0,010	0,596
	24/2/2004	250	5.500	744,3	110,0	3.085	1.140,0	125,4	0,013	0,609
25/2/2004	250	5.750	778,1	30,0	3.115	1.263,0	37,9	0,004	0,613	
26/2/2004	250	6.000	811,9	26,0	3.141	1.275,0	33,2	0,003	0,616	
27/2/2004	250	6.250	845,8	118,0	3.259	1.391,0	164,1	0,017	0,633	
28/2/2004	250	6.500	879,6	42,0	3.301	1.410,0	59,2	0,006	0,639	

Tabela 9-18: Resumo dos valores referentes à segunda campanha de ensaios (2ª etapa – abastecimento com água), para a coluna 3, com densidade igual a 1,15.

	Data	Vol. Aplicado (ml)	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Equiv. (Litros de água/m3 solo)	Vol. Coletado (ml)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	DQO removida (mg)	Carga de DQO efluente (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO efluente Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 3 d = 1,15	14/01/2004	250	250	33,8	140,0	140	1.500,0	210,0	0,025	0,025
	15/01/2004	250	500	67,7	240,0	380	2.250,0	540,0	0,064	0,088
	16/01/2004	250	750	101,5	268,0	648	1.950,0	522,6	0,061	0,150
	17/01/2004	250	1.000	135,3	194,0	842	1.970,0	382,2	0,045	0,195
	20/01/2004	250	1.250	169,2	350,0	1.192	2.450,0	857,5	0,101	0,296
	21/01/2004	250	1.500	203,0	114,0	1.306	2.850,0	324,9	0,038	0,334
	22/01/2004	250	1.750	236,8	250,0	1.556	1.690,0	422,5	0,050	0,384
	23/01/2004	250	2.000	270,6	240,0	1.796	1.690,0	405,6	0,048	0,431
	24/01/2004	250	2.250	304,5	222,0	2.018	1.140,0	253,1	0,030	0,461
	06/02/2004	250	2.500	338,3	167,0	2.185	720,0	120,2	0,014	0,475
	07/02/2004	250	2.750	372,1	234,0	2.419	439,0	102,7	0,012	0,487
	10/02/2004	250	3.000	406,0	308,0	2.727	254,0	78,2	0,009	0,497
	11/02/2004	250	3.250	439,8	130,0	2.857	243,0	31,6	0,004	0,500
	12/02/2004	250	3.500	473,6	242,0	3.099	145,0	35,1	0,004	0,504
	13/02/2004	250	3.750	507,5	214,0	3.313	151,0	32,3	0,004	0,508
	14/02/2004	250	4.000	541,3	262,0	3.575	103,0	27,0	0,003	0,511
	17/02/2004	250	4.250	575,1	280,0	3.855	161,0	45,1	0,005	0,517
	18/02/2004	250	4.500	608,9	112,0	3.967	212,0	23,7	0,003	0,519
	19/02/2004	250	4.750	642,8	246,0	4.213	178,0	43,8	0,005	0,525
	20/02/2004	250	5.000	676,6	310,0	4.523	142,0	44,0	0,005	0,530
21/02/2004	250	5.250	710,4	210,0	4.733	140,0	29,4	0,003	0,533	
24/02/2004	250	5.500	744,3	354,0	5.087	128,0	45,3	0,005	0,539	
25/02/2004	250	5.750	778,1	115,0	5.202	176,0	20,2	0,002	0,541	
26/02/2004	250	6.000	811,9	228,0	5.430	123,0	28,0	0,003	0,544	
27/02/2004	250	6.250	845,8	304,0	5.734	95,0	28,9	0,003	0,548	
28/02/2004	250	6.500	879,6	246,0	5.980	86,0	21,2	0,002	0,550	

Tabela 9-19: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (2ª etapa – abastecimento com água), para a coluna 4, com densidade igual a 1,30.

	Data	Vol. Aplicado (ml)	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Equiv. (Litros de água/m ³ solo)	Vol. Coletado (ml)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	DQO removida (mg)	Carga de DQO efluente (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO efluente Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 4 d = 1,30	14/01/2004	250	250	33,8	148,0	148	1.240,0	183,5	0,019	0,019
	15/01/2004	250	500	67,7	308,0	456	1.910,0	588,3	0,061	0,080
	16/01/2004	250	750	101,5	240,0	696	1.700,0	408,0	0,042	0,123
	17/01/2004	250	1.000	135,3	158,0	854	2.080,0	328,6	0,034	0,157
	20/01/2004	250	1.250	169,2	280,0	1.134	2.420,0	677,6	0,071	0,228
	21/01/2004	250	1.500	203,0	142,0	1.276	2.740,0	389,1	0,041	0,268
	22/01/2004	250	1.750	236,8	280,0	1.556	2.170,0	607,6	0,063	0,331
	23/01/2004	250	2.000	270,6	200,0	1.756	1.670,0	334,0	0,035	0,366
	24/01/2004	250	2.250	304,5	200,0	1.956	1.740,0	348,0	0,036	0,402
	06/02/2004	250	2.500	338,3	20,0	1.976	850,0	17,0	0,002	0,404
	07/02/2004	250	2.750	372,1	355,0	2.331	549,0	194,9	0,020	0,424
	10/02/2004	250	3.000	406,0	214,0	2.545	240,0	51,4	0,005	0,430
	11/02/2004	250	3.250	439,8	162,0	2.707	220,0	35,6	0,004	0,433
	12/02/2004	250	3.500	473,6	270,0	2.977	165,0	44,6	0,005	0,438
	13/02/2004	250	3.750	507,5	230,0	3.207	72,0	16,6	0,002	0,440
	14/02/2004	250	4.000	541,3	184,0	3.391	110,0	20,2	0,002	0,442
	17/02/2004	250	4.250	575,1	282,0	3.673	109,0	30,7	0,003	0,445
	18/02/2004	250	4.500	608,9	68,0	3.741	276,0	18,8	0,002	0,447
	19/02/2004	250	4.750	642,8	300,0	4.041	231,0	69,3	0,007	0,454
	20/02/2004	250	5.000	676,6	302,0	4.343	486,0	146,8	0,015	0,470
21/02/2004	250	5.250	710,4	200,0	4.543	199,0	39,8	0,004	0,474	
24/02/2004	250	5.500	744,3	284,0	4.827	151,0	42,9	0,004	0,478	
25/02/2004	250	5.750	778,1	170,0	4.997	194,0	33,0	0,003	0,482	
26/02/2004	250	6.000	811,9	210,0	5.207	152,0	31,9	0,003	0,485	
27/02/2004	250	6.250	845,8	216,0	5.423	116,0	25,1	0,003	0,487	
28/02/2004	250	6.500	879,6	260,0	5.683	121,0	31,5	0,003	0,491	

Tabela 9-20: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (2ª etapa – abastecimento com água), para a coluna 5, com densidade igual a 1,50

	Data	Vol. Aplicado (ml)	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Equiv. (Litros de água/m ³ solo)	Vol. Coletado (ml)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	DQO removida (mg)	Carga de DQO efluente (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO efluente Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 5 d = 1,50	14/01/2004	250	250	33,8	166,0	166	1.420,0	235,7	0,021	0,021
	15/01/2004	250	500	67,7	236,0	402	2.250,0	531,0	0,048	0,069
	16/01/2004	250	750	101,5	246,0	648	1.900,0	467,4	0,042	0,111
	17/01/2004	250	1.000	135,3	208,0	856	1.470,0	305,8	0,028	0,139
	20/01/2004	250	1.250	169,2	320,0	1.176	2.010,0	643,2	0,058	0,197
	21/01/2004	250	1.500	203,0	96,0	1.272	2.540,0	243,8	0,022	0,219
	22/01/2004	250	1.750	236,8	175,0	1.447	2.520,0	441,0	0,040	0,259
	23/01/2004	250	2.000	270,6	225,0	1.672	2.480,0	558,0	0,050	0,309
	24/01/2004	250	2.250	304,5	240,0	1.912	2.280,0	547,2	0,049	0,358
	06/02/2004	250	2.500	338,3	108,0	2.020	1.600,0	172,8	0,016	0,374
	07/02/2004	250	2.750	372,1	262,0	2.282	1.220,0	319,6	0,029	0,403
	10/02/2004	250	3.000	406,0	325,0	2.607	690,0	224,3	0,020	0,423
	11/02/2004	250	3.250	439,8	116,0	2.723	638,0	74,0	0,007	0,430
	12/02/2004	250	3.500	473,6	180,0	2.903	572,0	103,0	0,009	0,439
	13/02/2004	250	3.750	507,5	234,0	3.137	293,0	68,6	0,006	0,445
	14/02/2004	250	4.000	541,3	282,0	3.419	261,0	73,6	0,007	0,452
	17/02/2004	250	4.250	575,1	340,0	3.759	354,0	120,4	0,011	0,463
	18/02/2004	250	4.500	608,9	112,0	3.871	371,0	41,6	0,004	0,466
	19/02/2004	250	4.750	642,8	88,0	3.959	456,0	40,1	0,004	0,470
	20/02/2004	250	5.000	676,6	274,0	4.233	327,0	89,6	0,008	0,478
21/02/2004	250	5.250	710,4	84,0	4.317	446,0	37,5	0,003	0,482	
24/02/2004	250	5.500	744,3	474,0	4.791	310,0	146,9	0,013	0,495	
25/02/2004	250	5.750	778,1	150,0	4.941	409,0	61,4	0,006	0,500	
26/02/2004	250	6.000	811,9	108,0	5.049	345,0	37,3	0,003	0,504	
27/02/2004	250	6.250	845,8	114,0	5.163	500,0	57,0	0,005	0,509	
28/02/2004	250	6.500	879,6	120,0	5.283	359,0	43,1	0,004	0,513	

Tabela 9-21: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (2ª etapa – abastecimento com água), para a coluna 6, com densidade igual a 1,67.

	Data	Vol. Aplicado (ml)	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Equiv. (Litros de água/m3 solo)	Vol. Coletado (ml)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	DQO removida (mg)	Carga de DQO efluente (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO Efluen. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 6 d = 1,67	14/01/2004	250	250	33,8	88,0	88	2.000,0	176,0	0,014	0,014
	15/01/2004	250	500	67,7	72,0	160	2.800,0	201,6	0,016	0,031
	16/01/2004	250	750	101,5	86,0	246	2.720,0	233,9	0,019	0,050
	17/01/2004	250	1.000	135,3	68,0	314	2.460,0	167,3	0,014	0,063
	20/01/2004	250	1.250	169,2	175,0	489	2.390,0	418,3	0,034	0,097
	21/01/2004	250	1.500	203,0	52,0	541	2.260,0	117,5	0,010	0,107
	22/01/2004	250	1.750	236,8	68,0	609	2.080,0	141,4	0,011	0,118
	23/01/2004	250	2.000	270,6	75,0	684	2.180,0	163,5	0,013	0,131
	24/01/2004	250	2.250	304,5	82,0	766	2.330,0	191,1	0,015	0,147
	06/02/2004	250	2.500	338,3	40,0	806	1.750,0	70,0	0,006	0,152
	07/02/2004	250	2.750	372,1	50,0	856	2.110,0	105,5	0,009	0,161
	10/02/2004	250	3.000	406,0	145,0	1.001	1.900,0	275,5	0,022	0,183
	11/02/2004	250	3.250	439,8	40,0	1.041	2.170,0	86,8	0,007	0,190
	12/02/2004	250	3.500	473,6	42,0	1.083	2.460,0	103,3	0,008	0,199
	13/02/2004	250	3.750	507,5	40,0	1.123	1.790,0	71,6	0,006	0,204
	14/02/2004	250	4.000	541,3	44,0	1.167	2.260,0	99,4	0,008	0,213
	17/02/2004	250	4.250	575,1	112,0	1.279	2.150,0	240,8	0,020	0,232
	18/02/2004	250	4.500	608,9	42,0	1.321	2.320,0	97,4	0,008	0,240
	19/02/2004	250	4.750	642,8	46,0	1.367	2.060,0	94,8	0,008	0,248
	20/02/2004	250	5.000	676,6	45,0	1.412	2.210,0	99,5	0,008	0,256
21/02/2004	250	5.250	710,4	34,0	1.446	2.170,0	73,8	0,006	0,262	
24/02/2004	250	5.500	744,3	110,0	1.556	1.770,0	194,7	0,016	0,277	
25/02/2004	250	5.750	778,1	42,0	1.598	1.860,0	78,1	0,006	0,284	
26/02/2004	250	6.000	811,9	35,0	1.633	1.790,0	62,7	0,005	0,289	
27/02/2004	250	6.250	845,8	32,0	1.665	1.810,0	57,9	0,005	0,294	
28/02/2004	250	6.500	879,6	30,0	1.695	1.840,0	55,2	0,004	0,298	

Tabela 9-22: Valores do pH para as amostras coletadas.

Data	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
14/01/2004	8,18	8,42	7,94	7,67	8,02	8,64
15/01/2004	8,10	8,14	8,05	7,50	8,18	8,87
16/01/2004	8,04	8,26	7,85	7,47	8,02	8,84
17/01/2004	8,10	8,31	7,82	7,69	8,02	8,87
20/01/2004	8,50	8,56	7,99	7,64	8,12	8,91
21/01/2004	8,45	8,29	8,01	7,65	8,38	9,00
22/01/2004	8,27	8,41	8,05	7,66	8,39	8,96
23/01/2004	8,54	8,44	8,13	7,94	8,34	8,91
24/01/2004	8,40	8,55	8,24	8,02	8,37	8,91
06/02/2004	8,45		8,45		8,33	8,86
07/02/2004	8,38	8,98	7,32	7,44	7,46	8,88
10/02/2004	8,81	8,99	7,84	7,70	8,06	8,85
11/02/2004	8,48		7,66	7,51	8,04	8,90
12/02/2004	8,50	8,95	7,32	7,29	7,84	8,55
13/02/2004	8,44	8,49	7,80	7,56	7,70	8,51
14/02/2004	8,45	8,53	7,28	7,29	7,36	8,78
17/02/2004	8,63	8,77	7,37	7,31	7,37	8,71
18/02/2004	8,31		7,68	7,55	7,41	
19/02/2004	8,26	8,63	7,66	7,48	7,17	8,77
20/02/2004	8,40	8,73	7,64	7,32	7,18	8,74
21/02/2004	8,34	8,74	7,61	7,33	7,23	
24/02/2004	8,56	8,92	7,70	7,40	7,27	8,79
25/02/2004	8,52	9,03	7,66	7,42	7,33	8,76
26/02/2004	8,42	8,55	7,69	7,39	7,38	8,75
27/02/2004	8,55	8,01	7,86	7,82	7,67	8,82
28/02/2004	8,25	8,30	7,75	7,51	7,56	8,71

Tabela 9-23: Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^\circ\text{C}$, para as amostras coletadas.

Data	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
14/01/2004	7.590	9.040	13.740	14.130	14.150	11.660
15/01/2004	8.220	10.470	13.750	13.990	14.660	12.890
16/01/2004	8.650	11.200	12.460	12.190	13.600	12.960
17/01/2004	9.350	12.000	12.440	12.190	12.160	12.890
20/01/2004	10.240	12.600	13.400	13.180	11.930	13.300
21/01/2004	11.240	13.700	13.450	14.130	12.490	
22/01/2004	12.570	13.910	12.620	13.860	13.510	11.770
23/01/2004	13.860	13.090	9.400	10.260	12.860	13.250
24/01/2004	13.350	13.660	5.450	5.730	10.350	13.340
06/02/2004	13.320		1.924		3.850	
07/02/2004	13.700		1.686	2.250	3.030	11.870
10/02/2004	13.200	11.640	1.434	1.683	2.100	12.250
11/02/2004	13.130		1.310	1.430	1.684	
12/02/2004	12.200	11.430	1.200	1.276	1.550	10.940
13/02/2004	11.090	12.800	1.360	1.300	1.527	

Data	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
14/02/2004	9.610	12.630	1.275	1.418	1.474	10.700
17/02/2004	7.870	11.640	828	1.223	1.127	10.360
18/02/2004	7.080		657	905	894	
19/02/2004	6.100	10.590	534	624	831	8.930
20/02/2004	5.190	9.740	468	470	745	8.300
21/02/2004	4.380	8.560	466	460	654	
24/02/2004	3.340	7.600	462	425	563	7.530
25/02/2004	3.040		458	417	488	
26/02/2004	2.630		389	385	468	
27/02/2004	2.900	8.300	390	412	492	
28/02/2004	2.720	7.300	418	425	488	7.280

Tabela 9-24: Cor (PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart)

Data	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
14/01/2004	640	850	250	300	280	1360
15/01/2004	500	960	254	320	290	1320
16/01/2004	440	920	316	383	302	1300
17/01/2004	560	1100	492	521	343	1320
20/01/2004	670	1160	890	710	740	1400
21/01/2004	900	1270	930	920	1210	1320
22/01/2004	1000	1280	840	980	1340	1190
23/01/2004	1220	1310	720	1040	1510	1350
24/01/2004	1220	1210	720	1290	1730	1340
05/02/2004	1630	890	690	680	2110	1040
06/02/2004	1720	1260	434	600	2610	1250
07/02/2004	1710	1400	256	339	3750	1440
10/02/2004	1750	1350	212	310	5660	1440
11/02/2004	1740	1410	152	227	5820	1580
12/02/2004	1590	1710	152	113	3880	1600
13/02/2004	1460	1830	131	116	5220	1630
14/02/2004	1370	1740	1190	560	12000	1900
17/02/2004	1720		1890	1150	24200	1190
18/02/2004	1340	1580	2940	3390	37300	2000
19/02/2004	1160	1470	2720	8340	67000	2120
20/02/2004	1430	1460	2440	10600	74200	2020
21/02/2004	2930	1420	2850	10100	80000	2110
24/02/2004	3840	1310	2990	8520	125600	1920
25/02/2004	5810	1360	3580	8200	82400	1790
26/02/2004	11000	1450	2780	5360	68400	1700
27/02/2004	28600	1470	2540	5420	92200	1670

Tabela 9-25: Turbidez (FAU - Formazin Attenuation Units).

Data	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
14/01/2004	42	52	9	11	11	40
15/01/2004	34	64	11	11	10	34
16/01/2004	30	39	10	14	10	41
17/01/2004	35	59	21	14	20	30
20/01/2004	33	47	11	18	15	35
21/01/2004	42	53	11	23	19	
22/01/2004	43	50	7	25	18	32
23/01/2004	47	53	8	27	20	29
24/01/2004	45	44	8	30	29	22
05/02/2004	55		13		72	13
06/02/2004	70		12	21	116	19
07/02/2004	67	49	8	12	155	17
10/02/2004	67		9	14	225	19
11/02/2004	60	47	8	11	281	21
12/02/2004	61	65	9	9	173	20
13/02/2004	55	89	12	12	216	24
14/02/2004	48	76	56	29	487	29
17/02/2004	53		80	53	1.784	
18/02/2004	47	61	109	148	2.406	37
19/02/2004	45	49	82	357	4.100	39
20/02/2004	55	59	79	425	4.227	
21/02/2004	118	49	94	363	4.180	44
24/02/2004	156		111	381	5.440	37
25/02/2004	228	52	130	340	4.622	
26/02/2004	497	62	83	259	4.456	35
27/02/2004	2.008	93	77	223	4.472	28

Tabela 9-26: Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l).

Data	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
14/01/2004	3.948	5.548	7.952	7.860	7.400	6.580
16/01/2004	4.604	6.576	7.808	7.796	7.812	7.472
21/01/2004	6.308	7.344	9.924	10.088	9.108	6.788
24/01/2004	7.984	7.348	4.004	4.812	8.232	7.176
10/02/2004	7.696	7.684	1.096	1.416	2.368	8.036
13/02/2004	6.892	8.296	1.468	1.792	1.952	8.520
18/02/2004	5.356	8.200	696	1.076	3.552	10.480
21/02/2004	2.504	5.820	452	1.216	6.408	6.528
26/02/2004	2.524	5.764	540	1.048	7.932	8.024

Terceira Etapa

Esta terceira etapa da segunda campanha de ensaios ocorreu no período de 12/03/04 à 04/04/2004, quando efetuou-se o abastecimento por 18 (dezoito) em 24 dias, novamente com chorume, salientando-se que devido a colmatção acarretando na diminuição da

permeabilidade e prejudicando o andamento normal do ensaio, foram desconsideradas as colunas preenchidas com solo com densidade de 1,30 em condições saturadas e com densidade de 1,67 em condições não saturadas.

Destaca-se que esta etapa foi uma seqüência da campanha, portanto as características das colunas de percolação, foram iguais à da primeira campanha de ensaios, as quais encontram-se especificadas na Tabela 5-1.

Na Tabela 9-27 à Tabela 9-30, encontram-se descritos os resultados das análises de DQO do efluente das colunas e os resultados dos cálculos pertinentes à avaliação e discussão sobre este parâmetro.

Ressalta-se que se utilizou nos cálculos da eficiência e da carga removida, a DQO média do chorume, ou seja, 2.037,5 mg/l, obtida com a realização de ensaios periódicos durante toda a campanha.

Tabela 9-27: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (3ª etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 1, com densidade igual a 1,15, em condições saturadas.

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic. Equiv. (Litros de chorume/m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 1 d = 1,15 saturada	12/mar	250	33,8	2.100,0	0,06	0,06	24	560,0	73	0,004	0,004
	13/mar	500	67,7		0,06	0,12	72	980,0	52	0,006	0,010
	14/mar	750	101,5		0,06	0,18	138	864,0	58	0,009	0,019
	17/mar	1.000	135,3		0,06	0,24	343	773,0	62	0,031	0,050
	18/mar	1.250	169,2		0,06	0,30	410	798,0	61	0,010	0,060
	19/mar	1.500	203,0		0,06	0,36	498	825,0	60	0,013	0,072
	20/mar	1.750	236,8		0,06	0,42	586	793,0	61	0,013	0,085
	21/mar	2.000	270,6	1.750,0	0,06	0,48	674	725,0	64	0,014	0,099
	24/mar	2.250	304,5	1.950,0	0,06	0,54	884	737,0	64	0,032	0,131
	25/mar	2.500	338,3		0,06	0,60	962	767,0	62	0,012	0,142
	26/mar	2.750	372,1		0,06	0,66	1.019	769,0	62	0,009	0,151
	27/mar	3.000	406,0		0,06	0,72	1.077	750,0	63	0,009	0,160
	28/mar	3.250	439,8		0,06	0,78	1.142	609,0	70	0,011	0,171
	31/mar	3.500	473,6		0,06	0,84	1.320	653,0	68	0,029	0,200
	1/abr	3.750	507,5	2.350,0	0,06	0,90	1.376	834,0	59	0,008	0,208
	2/abr	4.000	541,3		0,06	0,96	1.414	588,0	71	0,006	0,214
3/abr	4.250	575,1		0,06	1,02	1.454	598,0	71	0,007	0,221	
4/abr	4.500	608,9		0,06	1,08	1.501	588,0	71	0,008	0,229	

Tabela 9-28: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (3ª etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 3, com densidade igual a 1,15.

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic.Equiv. (Litros de chorume/m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 3 d = 1,15	12/mar	250	33,8	2.100,0	0,06	0,06	41	60,0	97	0,01	0,01
	13/mar	500	67,7		0,06	0,12	291	220,0	89	0,05	0,06
	14/mar	750	101,5		0,06	0,18	541	80,0	96	0,06	0,12
	17/mar	1.000	135,3		0,06	0,24	921	40,0	98	0,09	0,21
	18/mar	1.250	169,2		0,06	0,30	1.051	80,0	96	0,03	0,24
	19/mar	1.500	203,0		0,06	0,36	1.231	95,0	95	0,04	0,28
	20/mar	1.750	236,8		0,06	0,42	1.501	82,0	96	0,06	0,34
	21/mar	2.000	270,6	1.750,0	0,06	0,48	1.729	132,0	94	0,05	0,39
	24/mar	2.250	304,5	1.950,0	0,06	0,54	2.134	301,0	85	0,08	0,48
	25/mar	2.500	338,3		0,06	0,60	2.246	926,0	55	0,01	0,49
	26/mar	2.750	372,1		0,06	0,66	2.446	1.322,0	35	0,02	0,51
	27/mar	3.000	406,0		0,06	0,72	2.704	2.120,0	(4)	(0,00)	0,51
	28/mar	3.250	439,8		0,06	0,78	3.004	1.920,0	6	0,00	0,51
	31/mar	3.500	473,6		0,06	0,84	3.419	2.820,0	(38)	(0,04)	0,47
	1/abr	3.750	507,5	2.350,0	0,06	0,90	3.561	2.100,0	(3)	(0,00)	0,47
	2/abr	4.000	541,3		0,06	0,96	3.798	1.440,0	29	0,02	0,49
3/abr	4.250	575,1		0,06	1,02	4.068	1.560,0	23	0,02	0,50	
4/abr	4.500	608,9		0,06	1,08	4.321	1.740,0	15	0,01	0,51	

Tabela 9-29: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (3ª etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 4, com densidade igual a 1,30.

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic.Equiv. (Litros de chorume/m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 4 d = 1,30	12/mar	250	33,8	2.100,0	0,05	0,05	53	140,0	93	0,01	0,01
	13/mar	500	67,7		0,05	0,11	341	420,0	79	0,05	0,06
	14/mar	750	101,5		0,05	0,16	577	112,0	95	0,05	0,11
	17/mar	1.000	135,3		0,05	0,21	937	66,0	97	0,07	0,18
	18/mar	1.250	169,2		0,05	0,27	1.097	47,0	98	0,03	0,21
	19/mar	1.500	203,0		0,05	0,32	1.311	146,0	93	0,04	0,26
	20/mar	1.750	236,8		0,05	0,37	1.536	81,0	96	0,05	0,30
	21/mar	2.000	270,6	1.750,0	0,05	0,42	1.776	427,0	79	0,04	0,34
	24/mar	2.250	304,5	1.950,0	0,05	0,48	2.141	355,0	83	0,06	0,41
	25/mar	2.500	338,3		0,05	0,53	2.281	580,0	72	0,02	0,43
	26/mar	2.750	372,1		0,05	0,58	2.411	680,0	67	0,02	0,45
	27/mar	3.000	406,0		0,05	0,64	2.708	790,0	61	0,04	0,48
	28/mar	3.250	439,8		0,05	0,69	2.898	870,0	57	0,02	0,51
	31/mar	3.500	473,6		0,05	0,74	3.298	600,0	71	0,06	0,57
	1/abr	3.750	507,5	2.350,0	0,05	0,80	3.463	3.180,0	(56)	(0,02)	0,55
	2/abr	4.000	541,3		0,05	0,85	3.588	2.050,0	(1)	(0,00)	0,55
3/abr	4.250	575,1		0,05	0,90	3.880	1.960,0	4	0,00	0,55	
4/abr	4.500	608,9		0,05	0,95	4.108	2.070,0	(2)	(0,00)	0,55	

Tabela 9-30: Resumo dos valores referentes a segunda campanha de ensaios (3ª etapa – abastecimento com chorume), para a coluna 5, com densidade igual a 1,50

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic.Equiv. (Litros de chorume/m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 5 d = 1,50	12/mar	250	33,8	2.100,0	0,05	0,05	44	150,0	93	0,01	0,01
	13/mar	500	67,7		0,05	0,09	87	160,0	92	0,01	0,01
	14/mar	750	101,5		0,05	0,14	122	130,0	94	0,01	0,02
	17/mar	1.000	135,3		0,05	0,18	282	224,0	89	0,03	0,05
	18/mar	1.250	169,2		0,05	0,23	327	212,0	90	0,01	0,05
	19/mar	1.500	203,0		0,05	0,28	395	229,0	89	0,01	0,07
	20/mar	1.750	236,8		0,05	0,32	464	197,0	90	0,01	0,08
	21/mar	2.000	270,6	1.750,0	0,05	0,37	551	159,0	92	0,01	0,09
	24/mar	2.250	304,5	1.950,0	0,05	0,41	749	237,0	88	0,03	0,12
	25/mar	2.500	338,3		0,05	0,46	814	159,0	92	0,01	0,13
	26/mar	2.750	372,1		0,05	0,51	866	149,0	93	0,01	0,14
	27/mar	3.000	406,0		0,05	0,55	925	177,0	91	0,01	0,15
	28/mar	3.250	439,8		0,05	0,60	998	244,0	88	0,01	0,17
	31/mar	3.500	473,6		0,05	0,64	1.168	310,0	85	0,03	0,19
	1/abr	3.750	507,5	2.350,0	0,05	0,69	1.248	205,0	90	0,01	0,21
	2/abr	4.000	541,3		0,05	0,74	1.283	179,0	91	0,01	0,21
3/abr	4.250	575,1		0,05	0,78	1.378	174,0	91	0,02	0,23	
4/abr	4.500	608,9		0,05	0,83	1.501	108,0	95	0,02	0,25	

Na Tabela 9-31 à Tabela 9-35 são apresentados os valores obtidos para os ensaios de pH, Condutividade, Cor, Turbidez e Sólidos Totais, respectivamente, para esta terceira etapa da segunda campanha de ensaios.

Para as análises preliminares do afluyente (chorume) utilizado no abastecimento das colunas nesta terceira etapa da segunda campanha de ensaios, obteve-se o valor de pH igual 7,98. A Condutividade do chorume utilizado no abastecimento das colunas, obtida em análises preliminares, foi de 12.260 $\mu\text{s}/\text{cm}$. O valor da Cor do chorume utilizado no abastecimento das colunas, obtido em análises preliminares, foi de 3.500 PtCo. O valor da Turbidez do chorume utilizado no abastecimento das colunas, obtido em análises preliminares, foi de 216 FAU. A média do valor de Sólidos Totais da água no período foi igual à 7.391 mg/l.

Tabela 9-31: Valores do pH para as amostras dos efluentes coletados

Data	Coluna 1	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
12/mar	6,65	7,95	7,53	7,61
13/mar	8,72	7,53	7,45	7,77
14/mar	8,57	7,64	7,51	7,87
17/mar	8,52	7,27	7,55	8,20
18/mar	8,44	7,29	8,53	7,59
19/mar	8,29	7,49	7,05	7,52
20/mar	8,12	7,20	6,85	7,31
21/mar	8,33	7,13	6,83	7,46
24/mar	8,23	7,09	6,79	7,77
25/mar	8,65	7,13	7,02	8,08
26/mar	8,62	7,47	7,15	8,14
27/mar	8,64	8,14	7,13	8,21
28/mar	8,59	8,34	7,17	8,15
31/mar	8,51	8,68	7,75	8,49
1/abr	8,64	8,71	8,06	8,64
2/abr	8,65	8,52	8,20	8,58
3/abr	8,61	8,56	8,01	8,56
4/abr	8,64	8,59	8,61	8,17

Tabela 9-32: Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^\circ\text{C}$, para as amostras coletadas

Data	Coluna 1	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
12/mar		351	391	423
13/mar	1.996	605	875	447
14/mar	2.060	958	1.283	504
17/mar	1.933	970	1.053	473
18/mar	1.756	810	821	456
19/mar	1.781	942	719	453
20/mar	1.726	1.635	1.152	459
21/mar	1.655	2.900	2.160	478
24/mar	1.582	4.300	4.170	505
25/mar	1.412	4.440	4.910	480
26/mar	1.393	4.890	5.280	504
27/mar	1.324	5.880	5.330	537
28/mar	1.311	7.040	5.400	537
31/mar	1.266	7.920	6.270	656
1/abr	1.160	8.260	7.710	878
2/abr	1.157	8.830	8.270	1.013
3/abr	1.118	8.840	8.510	1.096
4/abr	1.136	8.330	7.880	989

Tabela 9-33: Cor (PtCo- Platinum - Cobalt Units Standart)

Data	Coluna 1	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
12/mar	33.100	940	1.810	27.100
13/mar	33.200	300	830	26.500
14/mar	34.500	83	69	21.800
17/mar	43.800	40	50	20.800
18/mar	61.800	74	65	16.000
19/mar	113.200	97	75	14.300
20/mar	60.600	40	44	10.500
21/mar	85.200	37	33	9.100
24/mar	55.600	40	35	9.200
25/mar	80.000	69	32	9.300
26/mar	74.000	250	50	9.000
27/mar	81.000	1.010	54	6.900
28/mar	55.600	1.440	101	5.500
31/mar	51.800	1.650	1.210	5.660
1/abr	52.000	1.710	1.920	3.710
2/abr	46.200	1.720	1.850	3.180
3/abr	36.800	1.590	1.780	1.260
4/abr	40.300	1.590	1.680	461

Tabela 9-34: Turbidez (FAU - Formazin Attenuation Units).

Data	Coluna 1	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
12/mar		34	85	2.229
13/mar	2.118	38	55	2.129
14/mar	2.276	16	10	1.789
17/mar	2.698	5	12	921
18/mar	4.500	4	9	713
19/mar	4.668	13	4	672
20/mar	4.980	13	17	486
21/mar	4.852	8	19	454
24/mar	2.826	6	8	395
25/mar	4.232	15	15	351
26/mar	4.440	7	3	358
27/mar	4.362	11	7	288
28/mar	4.412	18	15	236
31/mar	4.026	20	21	340
1/abr	2.735	26	22	221
2/abr	2.565	20	20	199
3/abr	2.386	14	15	70
4/abr	2.229	13	15	31

Tabela 9-35: Eficiência na redução de Sólidos Totais (mg/l)

Data	Coluna 1	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
12/mar	80	94	92	51
14/mar	31	89	84	59
19/mar	(43)	92	93	74
24/mar	(26)	50	54	80
27/mar	(10)	18	17	84
1/abr	12	8	4	89
4/abr	25	9	1	88

8.3 TERCEIRA CAMPANHA DE ENSAIOS

Para a terceira campanha de ensaios, adotaram-se colunas com densidades 1,15; 1,30 e 1,50, em duplicata, todas em condições não saturadas, alimentando uma com um volume de 0,25 litros de chorume e outra com 0,25 litros de água, por dia ao longo de 20 dias, o que representa uma taxa concentrada diária de $0,034 \text{ m}^3 \text{ chorume} / \text{m}^3 \text{ SoloSeco}$, sendo avaliado os parâmetros DQO para todas as amostras coletadas e Sólidos Totais, pH, Condutividade e Alcalinidade, para amostras compostas ao longo da semana, totalizando 3 amostras, porém foram formadas 4 amostras compostas durante esta

campanha, sendo que, para o efluente das colunas abastecidas com chorume analisou-se ainda os metais: Zinco, Cádmio e Chumbo para as 4 amostras, e para as colunas abastecidas com água, analisou-se os mesmos metais para 2 amostras.

Ressalta-se ainda que para esta terceira campanha de ensaios, utilizou-se chorume coletado em uma caixa de passagem próxima a frente de operação, obtendo-se assim, um chorume com características de chorume novo, diferente do utilizado nas campanhas anteriores, tentando assim avaliar mais esta variável do sistema.

Abaixo são apresentados os resultados, divididos entre as colunas abastecidas com chorume e colunas abastecidas com água.

Abastecimento com chorume

Na Tabela 9-36 à Tabela 9-38, encontram-se descritos os resultados das análises de DQO do efluente coletado nas colunas com densidades de 1,15; 1,30 e 1,50 respectivamente, abastecidas com chorume, e ainda os resultados dos cálculos pertinentes à avaliação e discussão sobre este parâmetro.

Ressalta-se que utilizou-se nos cálculos da eficiência e da carga removida, a DQO média do chorume ou seja 20.863 mg/l, obtida com a realização de ensaios periódicos durante toda a campanha.

Tabela 9-36: Resumo dos valores referentes à terceira campanha de ensaios (colunas abastecidas com chorume), para a coluna 1, com densidade igual a 1,15.

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic.Equiv. (Litros de chorume/m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 1 d = 1,15	08/05/2004	250	33,8		0,61	0,61	182	64,0	99,7	0,445	0,445
	09/05/2004	500	67,7		0,61	1,23	408	93,0	99,6	0,552	0,998
	12/05/2004	750	101,5	22.200,0	0,61	1,84	708	66,0	99,7	0,734	1,732
	13/05/2004	1.000	135,3		0,61	2,46	886	43,0	99,8	0,436	2,168
	14/05/2004	1.250	169,2		0,61	3,07	1.106	1.690,0	91,9	0,496	2,664
	15/05/2004	1.500	203,0		0,61	3,68	1.324	1.870,0	91,0	0,487	3,152
	16/05/2004	1.750	236,8		0,61	4,30	1.618	7.150,0	65,7	0,474	3,626
	19/05/2004	2.000	270,6	21.400,0	0,61	4,91	1.916	8.450,0	59,5	0,435	4,061
	20/05/2004	2.250	304,5		0,61	5,52	2.098	8.940,0	57,1	0,255	4,317
	21/05/2004	2.500	338,3		0,61	6,14	2.294	10.220,0	51,0	0,245	4,562
	22/05/2004	2.750	372,1		0,61	6,75	2.534	10.790,0	48,3	0,284	4,847
	23/05/2004	3.000	406,0		0,61	7,37	2.764	11.570,0	44,5	0,252	5,098
	26/05/2004	3.250	439,8	18.990,0	0,61	7,98	3.018	10.590,0	49,2	0,307	5,405
27/05/2004	3.500	473,6		0,61	8,59	3.074	10.270,0	50,8	0,070	5,475	

Tabela 9-37: Resumo dos valores referentes à terceira campanha de ensaios (colunas abastecidas com chorume), para a coluna 3, com densidade igual a 1,30.

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic.Equiv. (Litros de chorume/m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 3 d = 1,30	08/05/2004	250	33,8		0,54	0,54	90	145,0	99,3	0,19	0,19
	09/05/2004	500	67,7		0,54	1,09	322	46,0	99,8	0,50	0,70
	12/05/2004	750	101,5	22.200,0	0,54	1,63	617	25,0	99,9	0,64	1,34
	13/05/2004	1.000	135,3		0,54	2,17	849	49,0	99,8	0,50	1,84
	14/05/2004	1.250	169,2		0,54	2,71	1.017	178,0	99,1	0,36	2,20
	15/05/2004	1.500	203,0		0,54	3,26	1.375	1.496,0	92,8	0,72	2,92
	16/05/2004	1.750	236,8		0,54	3,80	1.737	8.870,0	57,5	0,45	3,37
	19/05/2004	2.000	270,6	21.400,0	0,54	4,34	2.039	10.007,0	52,0	0,34	3,72
	20/05/2004	2.250	304,5		0,54	4,89	2.195	10.150,0	51,4	0,17	3,89
	21/05/2004	2.500	338,3		0,54	5,43	2.373	12.550,0	39,8	0,15	4,04
	22/05/2004	2.750	372,1		0,54	5,97	2.667	12.760,0	38,8	0,25	4,29
	23/05/2004	3.000	406,0		0,54	6,52	2.911	14.010,0	32,8	0,17	4,47
	26/05/2004	3.250	439,8	18.990,0	0,54	7,06	3.239	14.340,0	31,3	0,22	4,69
	27/05/2004	3.500	473,6		0,54	7,60	3.339	13.500,0	35,3	0,08	4,77

Tabela 9-38: Resumo dos valores referentes à terceira campanha de ensaios (colunas abastecidas com chorume), para a coluna 5, com densidade igual a 1,50.

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic.Equiv. (Litros de chorume/m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 5 d = 1,50	08/05/2004	250	33,8		0,47	0,47	138	94,0	99,5	0,26	0,26
	09/05/2004	500	67,7		0,47	0,94	362	21,0	99,9	0,42	0,68
	12/05/2004	750	101,5	22.200,0	0,47	1,41	732	37,0	99,8	0,70	1,37
	13/05/2004	1.000	135,3		0,47	1,88	902	24,0	99,9	0,32	1,69
	14/05/2004	1.250	169,2		0,47	2,35	1.148	57,0	99,7	0,46	2,16
	15/05/2004	1.500	203,0		0,47	2,82	1.318	89,0	99,6	0,32	2,47
	16/05/2004	1.750	236,8		0,47	3,29	1.662	4.720,0	77,4	0,50	2,98
	19/05/2004	2.000	270,6	21.400,0	0,47	3,76	1.997	8.410,0	59,7	0,38	3,35
	20/05/2004	2.250	304,5		0,47	4,23	2.139	9.510,0	54,4	0,15	3,50
	21/05/2004	2.500	338,3		0,47	4,71	2.227	9.800,0	53,0	0,09	3,59
	22/05/2004	2.750	372,1		0,47	5,18	2.487	10.850,0	48,0	0,23	3,82
	23/05/2004	3.000	406,0		0,47	5,65	2.807	13.040,0	37,5	0,23	4,05
	26/05/2004	3.250	439,8	18.990,0	0,47	6,12	3.167	14.620,0	29,9	0,20	4,25
27/05/2004	3.500	473,6		0,47	6,59	3.331	14.120,0	32,3	0,10	4,35	

Na Tabela 9-39 à Tabela 9-42 são apresentados os valores obtidos para os ensaios de pH, Condutividade, Alcalinidade e Sólidos Totais, para as amostras compostas semanalmente, para esta terceira campanha de ensaios.

Tabela 9-39: Valores do pH para as amostras coletadas

Data	Dias	Coluna 1	Coluna 3	Coluna 5	Chorume
12/05/2004	5	8,06	7,58	7,06	7,23
19/05/2004	12	4,36	4,39	4,37	7,24
26/05/2004	19	6,65	5,26	4,51	7,12

Tabela 9-40: Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^\circ\text{C}$, para as amostras coletadas

Data	Dias	Coluna 1	Coluna 3	Coluna 5	Chorume
12/05/2004	5	256	152	116	4.840
19/05/2004	12	2.440	2.220	1.850	6.920
26/05/2004	19	3.910	4.170	3.980	6.670

Tabela 9-41: Alcalinidade (mgCaCO_3/l)

Data	Dias	Coluna 1	Coluna 3	Coluna 5	Chorume
12/05/2004	5	140	94	47	4.380
19/05/2004	12	-	-	-	9.150
26/05/2004	19	2.200	910	-	20.000

Tabela 9-42: Redução de Sólidos Totais (%), tendo como referência os Sólidos Totais do chorume utilizado no abastecimento, obtido através da realização de ensaios durante toda a campanha de ensaios, sendo obtida a média de 26.711 mg/l .

Data	Dias	Coluna 1	Coluna 3	Coluna 5
12/05/2004	5	99	99	99
19/05/2004	12	87	89	93
26/05/2004	19	64	64	76

Na Tabela 9-43 são apresentados os resultados das análises de metais (Cd, Pb e Zn) do chorume utilizado no abastecimento das colunas.

Na Tabela 9-44 à Tabela 9-46, são apresentados os valores obtidos para as análises de metais (Cd, Pb e Zn) efetuadas para as amostras compostas semanalmente, somente nesta campanha de ensaios.

Tabela 9-43: Concentração de Metais (Cd, Pb e Zn) no chorume utilizado no abastecimento das colunas (mg/l)

	Cádmio	Chumbo	Zinco
Chorume	0,057	0,173	1,07

Tabela 9-44: Concentração de Cádmio no efluente das colunas abastecidas com chorume (mg/l).

Data	Dias	Coluna 1	Coluna 3	Coluna 5
12/05/2004	5	N.D.	N.D.	0,044
19/05/2004	12	0,043	0,028	0,018
26/05/2004	19	0,031	0,044	0,048
29/05/2004	22	0,043	0,049	0,074

Tabela 9-45: Concentração de Chumbo no efluente das colunas abastecidas com chorume (mg/l).

Data	Dias	Coluna 1	Coluna 3	Coluna 5
12/05/2004	5	0,033	0,064	0,098
19/05/2004	12	0,066	0,065	0,047
26/05/2004	19	0,103	0,126	0,095
29/05/2004	22	0,100	0,145	0,080

Tabela 9-46: Concentração de Zinco no efluente das colunas abastecidas com chorume (mg/l)

Data	Dias	Coluna 1	Coluna 3	Coluna 5
12/05/2004	5	0,025	0,034	1,019
19/05/2004	12	2,470	2,740	2,390
26/05/2004	19	0,971	2,127	2,830
29/05/2004	22	0,142	0,383	0,087

Abastecimento com água

Abaixo são apresentados os resultados das análises dos efluentes das colunas abastecidas com água (colunas n^{os} 2, 4 e 6, com densidades 1,15; 1,30 e 1,50 respectivamente), durante a terceira campanha de ensaios.

Na Tabela 9-47 à Tabela 9-49, encontram-se descritos os resultados das análises de DQO do efluente coletado das colunas, e ainda os resultados dos cálculos pertinentes à avaliação e discussão sobre este parâmetro.

Tabela 9-47: Resumo dos valores referentes à terceira campanha de ensaios (abastecimento com água), para a coluna 2, com densidade igual a 1,15.

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic. Equiv. (Litros de chorume/m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 2 d = 1,15	08/05/2004	250	250	33,8	216,0	216	70,0	15	0,0018	0,002	08/05/2004
	09/05/2004	250	500	67,7	222,0	438	44,0	10	0,0011	0,003	09/05/2004
	12/05/2004	250	750	101,5	314,0	752	33,0	10	0,0012	0,004	12/05/2004
	13/05/2004	250	1.000	135,3	210,0	962	33,0	7	0,0008	0,005	13/05/2004
	14/05/2004	250	1.250	169,2	240,0	1.202	30,0	7	0,0008	0,006	14/05/2004
	15/05/2004	250	1.500	203,0	222,0	1.424	17,0	4	0,0004	0,006	15/05/2004
	16/05/2004	250	1.750	236,8	282,0	1.706	16,0	5	0,0005	0,007	16/05/2004
	19/05/2004	250	2.000	270,6	292,0	1.998	28,0	8	0,0010	0,008	19/05/2004
	20/05/2004	250	2.250	304,5	210,0	2.208	19,0	4	0,0005	0,008	20/05/2004
	21/05/2004	250	2.500	338,3	220,0	2.428	22,0	5	0,0006	0,009	21/05/2004
	22/05/2004	250	2.750	372,1	256,0	2.684	20,0	5	0,0006	0,009	22/05/2004
	23/05/2004	250	3.000	406,0	260,0	2.944	19,0	5	0,0006	0,010	23/05/2004
	26/05/2004	250	3.250	439,8	288,0	3.232	8,0	2	0,0003	0,010	26/05/2004
	27/05/2004	250	3.500	473,6	198,0	3.430	8,0	2	0,0002	0,010	27/05/2004

Tabela 9-48: Resumo dos valores referentes à terceira campanha de ensaios (abastecimento com água), para a coluna 4, com densidade igual a 1,30.

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic.Equiv. (Litros de chorume/m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 4 d = 1,30	08/05/2004	250	250	33,8	174,0	174	91,0	16	0,0016	0,002	08/05/2004
	09/05/2004	250	500	67,7	220,0	394	32,0	7	0,0007	0,002	09/05/2004
	12/05/2004	250	750	101,5	255,0	649	11,0	3	0,0003	0,003	12/05/2004
	13/05/2004	250	1.000	135,3	194,0	843	33,0	6	0,0007	0,003	13/05/2004
	14/05/2004	250	1.250	169,2	242,0	1.085	68,0	16	0,0017	0,005	14/05/2004
	15/05/2004	250	1.500	203,0	256,0	1.341	77,0	20	0,0021	0,007	15/05/2004
	16/05/2004	250	1.750	236,8	250,0	1.591	45,0	11	0,0012	0,008	16/05/2004
	19/05/2004	250	2.000	270,6	294,0	1.885	66,0	19	0,0020	0,010	19/05/2004
	20/05/2004	250	2.250	304,5	230,0	2.115	28,0	6	0,0007	0,011	20/05/2004
	21/05/2004	250	2.500	338,3	216,0	2.331	26,0	6	0,0006	0,012	21/05/2004
	22/05/2004	250	2.750	372,1	254,0	2.585	24,0	6	0,0006	0,012	22/05/2004
	23/05/2004	250	3.000	406,0	258,0	2.843	24,0	6	0,0006	0,013	23/05/2004
	26/05/2004	250	3.250	439,8	282,0	3.125	6,0	2	0,0002	0,013	26/05/2004
	27/05/2004	250	3.500	473,6	190,0	3.315	12,0	2	0,0002	0,013	27/05/2004

Tabela 9-49: Resumo dos valores referentes a terceira campanha de ensaios (abastecimento com água), para a coluna 6, com densidade igual a 1,50.

	Data	Vol. Aplicado acumulado (ml)	Vol. Aplic. Equiv. (Litros de chorume/m3 solo)	DQO chorume (mg/l)	Carga de DQO aplicada (gDQO/kg solo seco)	Carga DQO aplic. acum. (gDQO/kg solo seco)	Vol. Coletado acumulado (ml)	DQO efluente (mg/l)	% de remoção de DQO	Carga de DQO removida (gDQO/kg solo seco)	Carga de DQO rem. Acum. (gDQO/kg solo seco)
Coluna 6 d = 1,50	08/05/2004	250	250	33,8	172,0	172	99,0	17	0,0015	0,002	08/05/2004
	09/05/2004	250	500	67,7	262,0	434	35,0	9	0,0008	0,002	09/05/2004
	12/05/2004	250	750	101,5	280,0	714	20,0	6	0,0005	0,003	12/05/2004
	13/05/2004	250	1.000	135,3	210,0	924	10,0	2	0,0002	0,003	13/05/2004
	14/05/2004	250	1.250	169,2	242,0	1.166	36,0	9	0,0008	0,004	14/05/2004
	15/05/2004	250	1.500	203,0	224,0	1.390	34,0	8	0,0007	0,005	15/05/2004
	16/05/2004	250	1.750	236,8	284,0	1.674	26,0	7	0,0007	0,005	16/05/2004
	19/05/2004	250	2.000	270,6	300,0	1.974	28,0	8	0,0008	0,006	19/05/2004
	20/05/2004	250	2.250	304,5	180,0	2.154	27,0	5	0,0004	0,006	20/05/2004
	21/05/2004	250	2.500	338,3	250,0	2.404	31,0	8	0,0007	0,007	21/05/2004
	22/05/2004	250	2.750	372,1	252,0	2.656	22,0	6	0,0005	0,008	22/05/2004
	23/05/2004	250	3.000	406,0	256,0	2.912	14,0	4	0,0003	0,008	23/05/2004
	26/05/2004	250	3.250	439,8	258,0	3.170	14,0	4	0,0003	0,008	26/05/2004
27/05/2004	250	3.500	473,6	234,0	3.404	20,0	5	0,0004	0,009	27/05/2004	

Salienta-se que foram realizadas análises de DQO da água utilizada no abastecimento, porém obtendo-se valores iguais ou muito próximos à zero, portanto considerou-se que a água utilizada era isenta de carga orgânica.

Na Tabela 9-50 à Tabela 9-53, são apresentados os valores obtidos para os ensaios de pH, Condutividade, Alcalinidade e Sólidos Totais, para as amostras do efluente, compostas semanalmente, para esta terceira campanha de ensaios.

Tabela 9-50: Valores do pH para as amostras coletadas

Data	Dias	Coluna 2	Coluna 4	Coluna 6	Água
12/05/2004	5	7,25	7,09	6,95	7,52
19/05/2004	12	6,87	6,82	6,99	7,59
26/05/2004	19	6,68	6,32	6,35	7,65

Tabela 9-51: Valores da Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$) $T=32^\circ\text{C}$, para as amostras coletadas

Data	Dias	Coluna 2	Coluna 4	Coluna 6	Água
12/05/2004	5	7.590	9.040	13.740	14.130
19/05/2004	12	8.220	10.470	13.750	13.990
26/05/2004	19	8.650	11.200	12.460	12.190

Tabela 9-52: Alcalinidade (mgCaCO_3/l)

Data	Dias	Coluna 2	Coluna 4	Coluna 6	Água
12/05/2004	5	50	52	58	64
19/05/2004	12	28	40	45	64
26/05/2004	19	42	24	28	64

Tabela 9-53: Sólidos Totais (mg/l) do efluente das colunas, descontando-se os Sólidos Totais da água utilizada no abastecimento das mesmas, obtido através da realização de ensaios da água durante toda a campanha de ensaios, sendo obtida a média de $124 \text{ mg}/\text{l}$.

Data	Dias	Coluna 2	Coluna 4	Coluna 6
12/05/04	5	76	132	48
19/05/04	12	36	20	40
26/05/04	19	152	212	188