



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA

SAMARA FERREIRA ANDRADE

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE RECIRCULAÇÃO DE CHORUME EM ATERROS
TROPICAIS – ESTUDO DE CASO DO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO
CENTRO (ASMC).**

Salvador – BA
2014

SAMARA FERREIRA ANDRADE

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE RECIRCULAÇÃO DE CHORUME EM ATERROS
TROPICAIS – ESTUDO DE CASO DO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO
CENTRO (ASMC).

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Ph. D. Sandro Lemos Machado

Salvador – BA

2014

A553 Andrade, Samara Ferreira.

Aplicação da técnica de recirculação de chorume em aterros tropicais: estudo de caso do Aterro Sanitário Metropolitano Centro (ASMC) / Samara Ferreira Andrade. – Salvador, 2014.

173f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Lemos Machado.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2014.

1. Chorume - recirculação. 2. Aterro sanitário. 3. Resíduo sólido urbano. 4. Monitoramento geotécnico. I. Machado, Sandro Lemos. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD: 268.44

SAMARA FERREIRA ANDRADE

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE RECIRCULAÇÃO DE CHORUME EM ATERROS
TROPICAIS – ESTUDO DE CASO DO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO
CENTRO (ASMC).

Salvador, 16 de Julho de 2014.

Banca Examinadora:

Prof. Ph. D. Sandro Lemos Machado – Orientador
Universidade Federal da Bahia – UFBA

Prof. Ph. D. Miriam de Fátima Carvalho
Universidade Católica do Salvador – UCSAL

Prof. Ph. D. Miriam Gonçalves Miguel
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Com muito amor e carinho dedico este trabalho a minha filha, amiga e companheira Dandara, minha principal fonte de inspiração, que sacrificou parte de sua infância para me ajudar nessa etapa de nossas vidas. Dedico também a meu marido Fábio e aos meus sogros Raymunda e José Maurício pelo apoio, dedicação e longas jornadas auxiliando na criação de minha pequena, para que fosse possível a conclusão desta pesquisa, que sem sombra de dúvidas, este trabalho é deles também.

AGRADECIMENTOS

A Deus e aos espíritos de luz por me iluminarem e protegerem em todos os momentos de minha vida.

A minha família, que é a base de minha história e dessa árdua e prazerosa caminhada. Por estarem sempre presentes, compartilhando alegrias e auxiliando nas provas e expiações.

Ao querido professor Sandro Lemos Machado, por me permitir caminhar em novos horizontes. Sempre presente com muita atenção, compreensão, paciência e bom humor. Compartilhando conhecimentos de forma tranquila e educativa.

As queridas professoras Míriam de Fátima Carvalho e Iara Brandão pelas orientações, compreensão, carinho e incentivo, sempre contribuindo para o sucesso desse trabalho.

Ao grande amigo e mestre Átila Caldas, meu querido Brutus, pela amizade, disponibilidade, apoio, ensinamentos, sabedoria e contribuições durante essa jornada.

Aos queridos amigos do GEOAMB Mario Sérgio, Leonardo, Gustavo, Ritinha e Jeová pela convivência agradável durante todo este tempo. Serei eternamente grata pela receptividade, carinho, apoio e amizade. Em especial aos técnicos Antônio e Ricardo que se empenharam e tiveram um compromisso diferenciado para realização desse trabalho.

À BATTRE e aos seus funcionários, por atuarem em parceria com o GEOAMB e UFBA subsidiando e apoiando o desenvolvimento desta e diversas outras pesquisas no estado da Bahia.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos amigos da turma de 2012 do MEAU, Eudóxio, Carmem, Sônia, Juliana e Bruno pelas discussões, contribuições e orientações durante todo esse período.

Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.

Cora Coralina

ANDRADE, S. F. Samara Ferreira Andrade. Aplicação da técnica de recirculação de chorume em aterros tropicais – Estudo de caso do Aterro Sanitário Metropolitano Centro (ASMC). 173 p., Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

Resumo

Em Salvador, assim como em várias outras capitais brasileiras, os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são direcionados para aterros sanitários, onde sofrem um processo de degradação predominantemente anaeróbio ocasionando a geração de metano, dióxido de carbono, gás sulfídrico, amônia, e outros gases, além do chorume. Diversos estudos apontam que o processo de disposição do RSU aliado com recirculação do chorume mostra ser consideravelmente preferível ao processo convencional, visto que, incidindo a recirculação do percolato até a estabilização do mesmo, ocorre uma diminuição dos custos operacionais tornando, então, a técnica bastante atrativa. Desta forma, esta pesquisa busca a investigação da aplicabilidade da técnica de recirculação do chorume em um aterro sanitário situado em região de clima tropical, avaliando a sua capacidade de provocar uma aceleração da estabilização destes resíduos, e um acréscimo do volume de biogás gerado no aterro, e contribuir para amenizar a carência de estudos em grande escala ligados às técnicas de recirculação de chorume no Brasil. Assim, foram pesquisadas as interferências da ação da recirculação do chorume em uma macrocélula de disposição de RSU com idades de aterramento variando de 04 a 17 anos. Os parâmetros estudados estavam voltados para produção, pressão, composição do biogás gerado na macrocélula, bem como aspectos geotécnicos tais como recalques e deslocamentos horizontais, aceleração do processo de estabilização dos resíduos e ampliação das oportunidades comerciais para Aterro Sanitário Metropolitano Centro (ASMC). Apesar do curto horizonte estudado (aproximadamente 15 meses), foram evidenciados discretos benefícios da aplicação da técnica sob aspectos geotécnicos, todavia não foram registrados eventos que comprovassem a viabilidade da mesma na otimização de produção de biogás em células com RSU, já em estágio avançado de decomposição.

Lista de Figuras

Figura 3-1– Registro fotográfico marco superficial antes da instalação no ASMC.....	38
Figura 3-2 - Registro fotográfico piezômetro câmara dupla instalado no ASMC.	38
Figura 3-3 – Participação de fontes renováveis na matriz elétrica.	41
Figura 3-4 – Crescimento do consumo de energia elétrica e PIB.	41
Figura 3-5 - Esquema genérico de uma instalação de incineração.	47
Figura 3-6 - Esquema genérico de uma instalação de incineração.	47
Figura 3-7 - Sistema de coleta de RSU através do arco de plasma da PyroGenesis.	50
Figura 3-8 - Configuração esquemática do biorreator em escala laboratorial.	54
Figura 3-9 – Resultados alcançados – DQO.....	55
Figura 3-10 – Resultados alcançados – Ácidos Graxos Voláteis (AGV).....	55
Figura 3-11 – Resultados alcançados – Amônia.	55
Figura 3-12 – Resultados alcançados - pH.	56
Figura 3-13 – Volumes de chorume produzidos e utilizados no experimento.	57
Figura 3-14 – Resultados da produção de gás.	57
Figura 3-15 – Resultados das análises dos parâmetros químicos analisados.	58
Figura 3-16 – Pulverização do chorume via caminhão-tanque.....	60
Figura 3-17 – Poços de injeção de chorume.....	60
Figura 3-18 – Sistema de injeção de chorume.....	61
Figura 4-1 – Vista aérea do ASMC.....	68
Figura 4-2 – Vista Termoverde.	69
Figura 4-3 – Motogeradores de 1038 KW.	69
Figura 4-4 – área de compressores e filtros.	69
Figura 4-5 – Sistema de recuperação de biogás.....	71
Figura 4-6– Dreno Profundo.	71
Figura 4-7 - Curva do comportamento da geração total de CH ₄ no ASMC.....	72
Figura 4-8 - Curva do comportamento da geração total de CH ₄ na Macro célula.	72
Figura 4-9 – Registro fotográfico das bacias gêmeas de contenção de chorume.....	75
Figura 4-10 – Registro fotográfico da bacia envelopada de contenção de chorume.....	75
Figura 4-11 – Registro fotográfico do pátio de carga de chorume.....	76
Figura 4-12 – Atividades de Caracterização do RSU no ASMC.	77
Figura 4-13 – Processo de caracterização dos RSN no ASMC.	78
Figura 4-14 – Localização dos pontos de amostragens dos RSV no ASMC – Destaque para pontos na macro célula (círculo amarelo).	83
Figura 4-15 – Processo de caracterização dos RSV no ASMC.....	84
Figura 5-1 – Croqui esquemático células de disposição - ASMC.	86
Figura 5-2 – Registro fotográfico macro célula 1 – destaque para áreas de disposição do resíduo sólido recente e resíduo sólido antigo.	87
Figura 5-3 – Localização dos drenos na macro célula.....	89

Figura 5-4 – Produção de biogás DE-102.....	90
Figura 5-5 – Localização dos pontos de coleta de chorume relacionados com a pesquisa – destaque círculos azul claro.....	91
Figura 5-6 – Croqui esquemático sistema de recirculação de chorume.....	92
Figura 5-7 - Croqui esquemático Poços e Drenos tipo P1.....	93
Figura 5-8 – Croqui esquemático Drenos P2.....	94
Figura 5-9 – Tanque de recirculação de chorume.....	95
Figura 5-10 – Válvula de retenção e controle da taxa de injeção de chorume.....	96
Figura 5-11 - Localização dos marcos superficiais (vermelho) e piezômetros (marrom) – destaque para marcos (círculo azul), piezômetros (círculo verde) e tanque de recirculação (quadrado verde) situados na macrocélula.....	97
Figura 5-12 - Detalhes do marco superficial instalados no ASMC.....	98
Figura 5-13 – Croqui piezômetros instalados na macrocélula.....	100
Figura 5-14 – Medidor de nível – destaque para sensor.....	103
Figura 5-15– Medidor de nível.....	103
Figura 5-16 – Inserção do medidor de nível no dreno.....	104
Figura 5-17 – Ajuste do sensor no dreno.....	104
Figura 5-18– Verificação do nível de chorume no dreno.....	104
Figura 5-19 – Procedimento de limpeza do tanque de chorume.....	105
Figura 5-20 – Local da instalação inicial do hidrômetro.....	105
Figura 5-21 – Hidrômetro instalado.....	105
Figura 6-1 – Evolução mensal das massas de resíduos dispostas no ASMC.....	107
Figura 6-2 – Evolução anual das massas de resíduos dispostas no ASMC.....	108
Figura 6-3 – Evolução das massas de RSU aterradas na macrocélula.....	109
Figura 6-4 – Distribuição percentual dos RSU aterradas na macrocélula.....	110
Figura 6-5 – Caracterização do chorume bacias de contenção – destaque em amarelo para fase com recirculação de chorume.....	110
Figura 6-6 – Relação DBO/DQO do chorume bacias de contenção.....	111
Figura 6-7 – Relação volume de chorume x precipitação.....	113
Figura 6-8 – Caracterização do chorume: pH, DQO e Condutividade – Pontos P1, P2, P3 e P4.....	114
Figura 6-9 – Caracterização do chorume: pH, DQO e Condutividade – P5 e P6.....	116
Figura 6-10 – Volumes de chorume – piezômetros macrocélula.....	117
Figura 6-11 – Pressão Biogás PZ-03.....	118
Figura 6-12 – Pressão Biogás PZ-04.....	118
Figura 6-13 – Pressão Biogás PZ-10.....	119
Figura 6-14 – Pressão Biogás PZ-11.....	119
Figura 6-15 – Pressão Biogás PZ-05.....	120
Figura 6-16 – Pressão Biogás PZ-02.....	121
Figura 6-17 – Pressão Biogás PZ-12.....	121
Figura 6-18 – Relação massa de RSU aterrada e vazão média do biogás gerado em todo aterro.....	122
Figura 6-19 – Relação vazão média biogás X composição do biogás.....	122

Figura 6-20 – Diferença entre vazão de metano medida e a prevista.	124
Figura 6-21 – Produção de biogás na macrocélula ao longo dos anos.	124
Figura 6-22- Produção de biogás DE-008.	125
Figura 6-23- Produção de biogás DE-013.	126
Figura 6-24- Produção de biogás DE-102.	126
Figura 6-25- Produção de biogás DE-143.	126
Figura 6-26- Produção de biogás DE-159. Fonte:	127
Figura 6-27- Produção de biogás DE-012.	127
Figura 6-28- Produção de biogás DE-103.	128
Figura 6-29- Produção de biogás DE-105.	128
Figura 6-30- Produção de biogás DE-210.	128
Figura 6-31 – Divisão da macrocélula em 6 grupos de acompanhamento – marcação dos marcos superficiais.	130
Figura 6-32 – Evolução recalques parciais - marcos superficiais grupo 1.	132
Figura 6-33 – Evolução das velocidades médias de recalque - marcos superficiais grupo 1.	132
Figura 6-34 – Evolução dos recalques acumulados - marcos superficiais grupo 1.	132
Figura 6-35 – Evolução recalques parciais - marcos superficiais grupo 2.	133
Figura 6-36 – Evolução das velocidades médias de recalque - marcos superficiais grupo 2.	134
Figura 6-37 – Evolução dos recalques acumulados - marcos superficiais grupo 2.	134
Figura 6-38 – Evolução recalques parciais - marcos superficiais grupo 3.	135
Figura 6-39 – Evolução das velocidades médias de recalque - marcos superficiais grupo 3.	135
Figura 6-40 – Evolução dos recalques acumulados - marcos superficiais grupo 3.	136
Figura 6-41 – Evolução recalques parciais - marcos superficiais grupo 4.	137
Figura 6-42 – Evolução das velocidades médias de recalque - marcos superficiais grupo 4.	137
Figura 6-43 – Evolução dos recalques acumulados - marcos superficiais grupo 4.	137
Figura 6-44 – Evolução recalques parciais - marcos superficiais grupo 5.	138
Figura 6-45 – Evolução das velocidades médias de recalque - marcos superficiais grupo 5.	138
Figura 6-46 – Evolução dos recalques acumulados - marcos superficiais grupo 5.	139
Figura 6-47 – Evolução recalques parciais - marcos superficiais grupo 6.	140
Figura 6-48 – Evolução das velocidades médias de recalque - marcos superficiais grupo 6.	140
Figura 6-49 – Evolução dos recalques acumulados - marcos superficiais grupo 6.	140
Figura 6-50 – Evolução dos recalques acumulados ASMC.	142
Figura 6-51 – Evolução dos recalques célula 1 - Muribeca.	142
Figura 6-52 – Evolução dos recalques célula 2 - Muribeca.	143
Figura 6-53 – Evolução dos deslocamentos horizontais parciais - marcos superficiais grupo 1.	144
Figura 6-54 – Velocidades médias dos deslocamentos horizontais - marcos superficiais grupo 1.	145
Figura 6-55 – Evolução dos deslocamentos horizontais acumulado - marcos superficiais grupo 1.	145
Figura 6-56 – Evolução dos deslocamentos horizontais parciais - marcos superficiais grupo 2.	146
Figura 6-57 – Evolução dos deslocamentos horizontais acumulado - marcos superficiais grupo 2.	146
Figura 6-58 – Velocidades médias dos deslocamentos horizontais - marcos superficiais grupo 2.	147
Figura 6-59 – Evolução dos deslocamentos horizontais parciais - marcos superficiais grupo 3.	148

Figura 6-60 – Velocidades médias dos deslocamentos horizontais - marcos superficiais grupo 3.....	148
Figura 6-61 – Evolução dos deslocamentos horizontais acumulado - marcos superficiais grupo 3.....	149
Figura 6-62 – Evolução dos deslocamentos horizontais parciais - marcos superficiais grupo 4.....	150
Figura 6-63 – Velocidades médias dos deslocamentos horizontais - marcos superficiais grupo 4.....	150
Figura 6-64 – Evolução dos deslocamentos horizontais acumulado - marcos superficiais grupo 4.....	151
Figura 6-65 – Evolução dos deslocamentos horizontais parciais - marcos superficiais grupo 5.....	152
Figura 6-66 – Velocidades médias dos deslocamentos horizontais - marcos superficiais grupo 5.....	152
Figura 6-67 – Evolução dos deslocamentos horizontais acumulado - marcos superficiais grupo 5.....	152
Figura 6-68 – Evolução dos deslocamentos horizontais parciais - marcos superficiais grupo 6.....	153
Figura 6-69 – Velocidades médias dos deslocamentos horizontais - marcos superficiais grupo 6.....	154
Figura 6-70 – Evolução dos deslocamentos horizontais acumulado - marcos superficiais grupo 6.....	154
Figura 10-1 – Trincas.....	169
Figura 10-2 – Trincas.....	169
Figura 10-3 – Trincas.....	170
Figura 10-4 – Trincas.....	170
Figura 10-5 – Trincas.....	170
Figura 10-6 – Trincas.....	170

Lista de Quadros

Quadro 3-1 Características dos principais componentes dos RSU	26
Quadro 3-2 Características das fases da digestão anaeróbia dos RSU	32
Quadro 3-3 Fases de estabilização do percolado em aterro	33
Quadro 3-4 – Vantagens e desvantagens da incineração de RSU	48
Quadro 3-5 – Vantagens e desvantagens da gaseificação de RSU.....	49
Quadro 3-6 Caracterização do chorume	52
Quadro 5-1- Disposição de RSU na macrocélula – ASMC	87
Quadro 5-2 - Evolução dos volumes de injeção de chorume na macrocélula no ASMC.	96
Quadro 5-3– Localização dos marcos superficiais na macrocélula	99
Quadro 5-4– Localização dos piezômetros na macrocélula.	100
Quadro 6-1– Estimativa da população atendida pelo ASMC.	108
Quadro 6-2– Detalhamento das contribuições de RSU dispostos no ASMC.	109
Quadro 6-3– Comparação qualitativa chorume bacias e dados encontrados na literatura.	112
Quadro 6-4– Comparação qualitativa chorume Macrocélula e dados encontrados na literatura.	116

Lista de Tabelas

Tabela 3-1 - Valores para BMP encontrados na literatura.....	45
Tabela 3-2 - Análise comparativa dos recalques superficiais.	65
Tabela 4-1 Resultados da geração e da composição química relativa do biogás, L_0 e dos valores ajustados de k para as amostras de RSU ensaiadas nos testes de BMP.....	74
Tabela 4-2 - composição gravimétrica dos RSN coletados em diferentes épocas, em termos de base seca (BS) e base úmida (BW).....	78
Tabela 4-3 - Composição física dos resíduos dispostos no ASMC.....	80
Tabela 4-4 – Comparativo da composição gravimétrica ASMC e Aterro Muribeca.	81
Tabela 4-5 - Teor de umidade médio, em base seca de cada componente do RSN coletado em diferentes datas.	81
Tabela 4-6 - Teor de umidade global para os resíduos novos estudados.....	82
Tabela 4-7 – Teor médio de sólidos totais voláteis, matéria orgânica e lignina obtidos para a fração pastosa dos resíduos estudados.	82
Tabela 4-8 - Teor de umidade em base seca, por componente dos RSU aterrados, coletados por meio de abertura de cavas.	84
Tabela 4-9 - Teor de umidade global para resíduos sólidos velhos (RSV) obtidos por meio de abertura de cavas.	85

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
 ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública de Resíduos
 AGV - Ácidos Graxos Voláteis
 AOV - Ácidos Orgânicos Voláteis
 ASMC - Aterro Sanitário Metropolitano Centro
 BATTRE – Bahia Transferência e Tratamento de Resíduos S/A
 BF - Fração Biodegradável
 BFw - Fração Biodegradável do resíduo como um todo
 BMP - Potencial Bioquímico de Metano
 BS - Base Seca
 BTEX - Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno
 BW - Base Úmida
 Ca - Cálcio
 Cd - Cádmiio
 CFC - Clorofluorcarbono
 CH₃COOH - Ácido acético
 CH₄ - Gás Metano
 CO₂ - Dióxido de Carbono (Gás Carbônico)
 COD - Carbono Orgânico Degradável
 COMGAS - Companhia de Gás de São Paulo
 COMLURB - Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro
 COMPESA - Companhia Pernambucana de Saneamento
 CONDER - Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia
 DC - Drenos de Coberturas
 DE - Drenos de Espinhas
 DG - Dreno de gás
 DJ - Dreno de Junção
 DP - Drenos Perfurados
 DS - Dreno de Superfície
 EPE - Empresas de Energia Elétrica
 ETE - Estação de Tratamento de Esgotos
 GEOAMB - UFBA - Laboratório de Geotecnia Ambiental
 INMET - Instituto Brasileiro de Meteorologia
 IPCC - Painel Intergovernamental de mudanças climáticas
 k - Constante relacionada à taxa de geração de metano
 K - Potássio
 L0 - Potencial de geração de metano
 LIMPURB - Empresa de Limpeza Urbana do Salvador

MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME - Ministério de Minas e Energia
mV - Milivolts
N₂ - Gás Nitrogênio
Na - Sódio
NH₃ - Amônia
NTK - Nitrogênio Total Kjeldahl
O₂ - Oxigênio
O₃ - Ozônio
PMS - Prefeitura Municipal do Salvador
ppbV - Partes por bilhão em volume
ppm - Partes por milhão
ppmv - Partes por milhão em volume
PROSAB - Programa de Pesquisas em Saneamento Básico
q - Taxa específica de geração de CH₄
Q - Geração horária de CH₄ estimada para as células de disposição do aterro
q* - Ajuste da taxa específica de geração de CH₄
R - Constante universal dos gases ideais
RSN – Resíduo Sólido Novo
RSV – Resíduos Sólido Velho
RSU - Resíduos Sólidos Urbanos
ST - Sólidos Totais
STV - Sólidos Totais Voláteis
SV - Sólidos Voláteis
UFBA - Universidade Federal da Bahia
VCC - Hidrocarbonetos Clorados Voláteis ou Solventes Clorados
VOC - Compostos Orgânicos Voláteis
w - Teor de umidade gravimétrica
θ - Teor de umidade volumétrica

Sumário

1. Introdução.....	19
2. Objetivos	23
2.1. Objetivo Geral.....	23
2.2. Objetivos Específicos.....	23
3. Revisão da literatura.....	24
3.1. Classificação dos resíduos sólidos urbanos (RSU)	24
3.2. Disposição final dos RSU em aterros sanitários.	26
3.3. Impactos ambientais associados a disposição inadequada dos RSU.....	29
3.4. Processos microbiológicos e a eficiência da degradação dos RSU em aterros.	31
3.5. Geotecnia em aterros sanitários.	36
3.5.1. Monitoramento de recalques e deslocamentos horizontais	38
3.5.2. Monitoramento do nível d'água e percolados.	40
3.6. Aproveitamento energético dos RSU.....	40
3.7. Estimativas da geração de biogás em aterros sanitários	42
3.8. Aproveitamento do poder calorífico dos RSU aterrados.....	45
3.8.1. Incineração	46
3.8.2. Gaseificação	48
3.8.3. Arco de plasma	49
3.9. Geração, tratamento e recirculação do chorume	51
3.10. Características do chorume	51
3.11. Tratamento para o chorume gerado em aterros sanitários.....	52
3.12. Recirculação do chorume em biorreatores.....	53
3.13. Recirculação do chorume em aterros sanitários.....	59
4. O Aterro Sanitário Metropolitano Centro - ASMC.....	67
4.1. Histórico de operação e funcionamento	67
4.2. Unidade geradora de energia – Termoverde.....	68
4.3. Sistema de recuperação de biogás.....	70
4.4. Estimativa de geração de metano no ASMC e na Macrocélula.....	71
4.5. Determinação do potencial bioquímico de metano do ASMC	73
4.6. Sistema de drenagem do chorume.....	74
4.7. Caracterização do RSU disposto no ASMC.....	76
5. Materiais e métodos.....	86
5.1. Área de estudo – Macrocélula de disposição de resíduos	86
5.2. Sistema de drenos de gás.	88
5.3. Monitoramento qualitativo do chorume.....	90
5.4. Sistema de recirculação do chorume.....	91
5.5. Monitoramento geotécnico.	96
5.6. Medição do nível de chorume nos drenos e da pressão do biogás	103
5.7. Limpeza do tanque de chorume	104
5.8. Instalação de hidrômetro	105

6.	Resultados e discussões.....	107
6.1.	Disposição de RSU no ASMC.....	107
6.2.	Caracterização do chorume.....	110
6.3.	Monitorização dos níveis de chorume na Macrocélula.....	117
6.4.	Monitorização da pressão do biogás.....	118
6.5.	Análise global da produção de metano.....	121
6.6.	Monitoramento geotécnico - Recalques.....	129
6.7.	Monitoramento dos deslocamentos horizontais.....	143
7.	Considerações finais.....	155
8.	Sugestões para trabalhos futuros.....	157
9.	Referências bibliográficas.....	158
10.	APENDICE.....	168
10.1.	Acompanhamento de campo – registro das intercorrências.....	168
10.2.	Caracterização do chorume em pontos específicos da macrocélula.....	172

1. Introdução

Um dos principais problemas ambientais e de saúde pública é proveniente da disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos (RSU). O resíduo sólido que vem recebendo maior atenção das administrações municipais, dos técnicos e da sociedade em geral, é o resíduo urbano, isso muito em função do grande volume gerado, dos problemas sanitários e consequentemente dos enormes custos envolvidos, sendo que esses resíduos são dispostos de diversas formas que nem sempre são as mais adequadas (PINTO e JUNIOR, 2000; GHANEM *et al.*, 2001).

A gestão e a destinação final dos RSU, comumente denominado de lixo, constituem um dos grandes problemas a ser enfrentado pela humanidade. No Brasil e em especial na Bahia, este é um problema de grande dimensão, perante o grande volume gerado, dificuldades logísticas para coleta e transporte, além da forma inadequada em que o resíduo tem sido disposto.

Uma das destinações finais mais conhecidas e utilizadas nos grandes centros urbanos brasileiros quando o assunto é RSU é o aterro sanitário. Ele é uma opção correta sob vários aspectos: ambientais, sanitários, sociais, dentre outros.

Ao chegar aos aterros sanitários, o RSU é disposto no terreno, obedecendo a critérios de engenharia e normas operacionais específicas. Todavia o aterro por si só não resolve o problema do RSU, uma vez que parte dos resíduos aterrados dá origem a um líquido de coloração escura, altamente poluidor, denominado chorume ou lixiviado. A composição básica do chorume irá variar de acordo com: tipos de resíduos contidos no aterro sanitário, forma como o aterro é executado e operado, hidrologia da região, dentre outros fatores.

Nos aterros sanitários, tanto a umidade do RSU quanto a do solo de cobertura, têm grande influência na formação do chorume. Segundo São Matheus (2008), no Aterro Sanitário Metropolitano Centro (ASMC), o teor de umidade inicial do RSU chega a ser o principal responsável pelo acúmulo de líquidos na célula, enquanto houver entrada de resíduos no aterro. A autora destaca ainda que é muito importante diferenciar o teor de umidade inicial do RSU do teor de umidade quando o resíduo estiver depositado no aterro. Segundo a autora, o teor de umidade inicial do RSU depende da composição do resíduo produzido e do tempo de exposição às intempéries antes e durante a coleta do RSU, enquanto que o teor de umidade do RSU já depositado depende da quantidade de água que infiltra no aterro, da evaporação, dos

procedimentos de operação do aterro, idade do RSU, profundidade de aterramento, funcionamento do sistema de drenagem de lixiviados, água de constituição do RSU liberada por processos biológicos e umidade removida com os gases do aterro.

Partindo do fato que os RSU quando dispostos em aterro sofrem um processo de degradação predominantemente anaeróbio ocasionando a geração de metano, dióxido de carbono, gás sulfídrico, amônia, e outros gases, além do chorume, como já citado, a adoção de técnicas de tratamento de RSU que incluam a recirculação de chorume pode representar uma aceleração do processo de estabilização dos resíduos em aterros sanitários, otimização da produção do biogás e ampliação das oportunidades comerciais para o mesmo, além de tornar-se bastante atrativa tendo em vista os aspectos ambientais, operacionais e financeiros.

Nesse sentido, segundo Cintra (2003), a adoção de técnicas de tratamento de RSU que incluam a recirculação de chorume pode representar uma aceleração do processo de estabilização da matéria biodegradável dos resíduos e tornar-se bastante atrativa tendo em vista os aspectos:

- i. Ambiental: uma vez que poderá ser aplicada na melhoria do tratamento dos RSU, revertendo-se em benefícios diretos para a proteção do solo e dos corpos de água receptores dos efluentes gerados no processo de decomposição de resíduos;
- ii. Operacional e financeiro: uma vez que poderá reduzir os custos das unidades de destinação final de RSU, além de disponibilizar critérios e parâmetros de projeto, obtidos para a realidade brasileira, possibilitando que as empresas de limpeza pública desenvolvam projetos mais otimizados.

Acredita-se que a aplicação da técnica de recirculação, aliada à gestão adequada dos RSU e a busca por fontes alternativas de geração de energia, pode auxiliar ou proporcionar uma autonomia financeira para o próprio aterro e contribuir para melhoria do balanço ambiental.

Salienta-se, contudo, que a adoção desta técnica pode trazer prejuízos para a estabilidade geotécnica do maciço de RSU, seja pelo aumento do nível de lixiviado ou pelo aumento nos valores de pressão de biogás que podem comprometer a estabilidade dos taludes.

Assim, o presente trabalho é focado na avaliação do desempenho e das interferências da técnica de recirculação do chorume no Aterro Sanitário Metropolitano Centro-ASMC

(localizado na Região Metropolitana de Salvador) em diversos aspectos do aterro, como nível de lixiviados, produção e pressão de biogás e estabilidade de taludes.

Para a realização deste trabalho foi utilizada a macrocélula de disposição de resíduos sólidos urbanos do ASMC. A macrocélula em questão permaneceu ativa durante o período compreendido entre outubro de 1997 a abril de 2003, onde recebeu 4.107.733,50 m³ de RSU, distribuídos em suas 4 células: C1, C2, C3, C4. Em abril de 2004 foi realizada a junção da macrocélula com célula C5 que operou durante os anos de 2003 a 2010, havendo períodos de ociosidade. Na macrocélula e em todo o ASMC encontra-se instalado um sistema de drenos de biogás interligado a uma termoelétrica, de forma a permitir que o biogás gerado seja captado, monitorado e convertido em energia elétrica. Assim, uma análise comparativa dos níveis de produção de biogás, dos parâmetros que influem na estabilidade do maciço de resíduos (pressão de biogás, nível de chorume e valores de recalque) e eficiência do processo de decomposição dos resíduos é desenvolvida empregando-se os períodos pré e pós-recirculação do chorume.

Para atender aos objetivos da pesquisa proposta, foi realizada uma revisão da literatura sobre os temas envolvidos, onde esta é apresentada no capítulo 3. A revisão está pautada em temas como: 3.1) Classificação dos resíduos sólidos urbanos (RSU); 3.2) Disposição dos RSU - Aterros Sanitários; 3.3) Impactos ambientais associados a disposição inadequada dos RSU; 3.4) Processos microbiológicos e a eficiência da degradação dos RSU em aterros; 3.5) Geotecnia em aterros sanitários; 3.6) Aproveitamento energético dos RSU; 3.7) Estimativas da geração de biogás em aterros sanitários; 3.8) Aproveitamento do poder calorífico dos RSU aterrados; 3.9) Características do chorume; 3.10) Tratamento para o chorume gerado em aterros sanitários; 3.11) Recirculação do chorume em biorreatores; e 3.12) Recirculação do chorume em aterros sanitários.

No capítulo 4, apresenta-se o Aterro Sanitário Metropolitano Centro – ASMC. Este capítulo encontra-se dividido em: 4.1) Histórico de operação e funcionamento; 4.2) Unidade geradora de energia – termoverde; 4.3) Sistema de recuperação de biogás; 4.4) Estimativa de geração de metano no ASMC e na Macrocélula; 4.5) Determinação do potencial bioquímico do metano no ASMC; 4.6) Sistema de drenagem do chorume; e 4.7) Caracterização do RSU disposto no ASMC.

No capítulo 5 são apresentados os materiais e métodos que foram utilizados durante toda

pesquisa, além da descrição da área de estudo e sistemas físicos nela instalados. Desta forma o capítulo encontra-se estruturado em: 5.1) Área de estudo – Macrocélula de disposição de resíduos; 5.2) Sistema de drenos de gás; 5.3) Monitoramento qualitativo do chorume; 5.4) Sistema de recirculação do chorume; 5.5) Monitoramento geotécnico; 5.6) Medição do nível de chorume nos drenos e da pressão do biogás; 5.7) Limpeza do tanque de chorume; e 5.8) Instalação de hidrômetro.

No capítulo 6 encontram-se listados os resultados e discussões, englobando o período anterior e durante a aplicação da técnica de recirculação do chorume na macrocélula, organizados em: 6.1) Disposição de RSU no ASMC; 6.2) Caracterização do chorume; 6.3) Monitorização dos níveis de chorume dentro da Macrocélula; 6.4) Análise global da produção de metano; 6.5) Monitoramento geotécnico – Recalques; 6.6) Monitoramento dos Deslocamentos Horizontais; e 6.7) Informações geotécnicas - Pressão do biogás.

No capítulo 7 estão listadas as considerações finais, no capítulo 8 as sugestões para trabalhos futuros, no capítulo 9 as referências bibliográficas e no capítulo 10 encontra-se o Apêndice.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a performance e as interferências da técnica de recirculação do chorume no Aterro Sanitário Metropolitano Centro (ASMC), em diversos aspectos do aterro, como nível de lixiviados, produção, composição e pressão de biogás e estabilidade de taludes.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar o impacto do uso da técnica de recirculação de chorume nos deslocamentos do maciço de RSU, no nível de lixiviado e nos valores de pressão de biogás.
- Avaliar as características do chorume e do biogás produzidos no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos, para duas situações diferentes: sem recirculação de chorume e com recirculação de chorume;
- Analisar a geração de CH₄ na macrocélula de resíduos por meio da comparação em períodos distintos: antes e durante a recirculação do chorume.

3. Revisão da literatura

3.1. Classificação dos resíduos sólidos urbanos (RSU)

Desde as sociedades primitivas, humanos e animais utilizam a Terra como recurso de apoio à vida e para dispor seus resíduos. Hoje em dia com o aumento populacional e mudanças nos hábitos de vida das pessoas, a produção e o descarte de resíduos transformaram-se num grande problema para a sociedade, tendo em vista a superação da capacidade do meio em assimilar os rejeitos descartados e as mudanças no perfil da população, cada vez mais consumista (TCHOBANOGLIOUS *et. al.*, 1993).

Para que seja possível criar alternativas sustentáveis modernas, viáveis economicamente e corretas do ponto de vista ambiental e social, torna-se necessário conhecer a fundo as características dos RSU e o comportamento da população local, uma vez que, sem a contribuição da sociedade, no que tange aos programas ambientais, dificilmente será possível alcançar o sucesso de ações que visem a melhoria do saneamento básico ambiental.

Considera-se como saneamento básico ambiental, todas as ações da sociedade cuja finalidade seja promover acesso ao abastecimento de água potável, coleta e disposição sanitária de resíduos sólidos urbanos, disciplina sanitária de uso do solo, drenagem urbana e controle de doenças transmissíveis, para proteger e melhorar as condições de vida da população.

A ABNT NBR 10.004/2004 que discorre sobre a classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente, apresenta a classificação dos resíduos sólidos em:

- Resíduo Classe I – Aqueles que apresentam periculosidade. Para fins desta norma, periculosidade seria a característica apresentada por um resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, pode apresentar inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, ou seja, são aqueles que apresentam risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices ou riscos ao meio-ambiente, quando gerenciados de forma inadequada;
- Resíduo Classe II – Resíduos não perigosos, subdivididos em:

- Resíduo Classe IIA – Os não inertes, ou seja, aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes, nos termos desta Norma. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Resíduo Classe IIB – Inertes, ou seja, quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Uma classificação dos resíduos sólidos bastante interessante é a apresentada por Barros (1998), que enfatizada a utilização de critérios diversificados para classificar os resíduos, tais como:

- Quanto à origem: domiciliar, comercial, público, industrial;
- Quanto à tratabilidade: biodegradável, descartável, reciclável;
- Quanto ao grau de biodegradabilidade: facilmente biodegradável (ex. matéria orgânica proveniente de folhas e restos de comida), moderadamente biodegradável (ex. papel, papelão, etc.), dificilmente biodegradável (ex. pano, borracha, etc.) ou não biodegradável (ex. vidro, plástico, metal, etc.);
- Quanto à reatividade: inerte, orgânico ou reativo.

O autor acrescenta que a dificuldade em se classificar os constituintes do RSU se deve à sua composição extremamente heterogênea, que varia de acordo com as condições socioeconômicas, climáticas e sazonais de cada região. Libânio (2002) defende a ideia de que a conceituação de RSU não deve se propor a discriminar em pormenores os constituintes da massa de resíduos, mas sim, delinear o conjunto das atividades que contribuem mais diretamente para a sua geração.

Sowers (1973) *apud* Boscov (2008) afirma que os componentes dos RSU são muito variados e apresentam propriedades físicas e químicas diferentes. O Quadro 2-1 apresenta as características dos principais componentes dos RSU.

Quadro 3-1 Características dos principais componentes dos RSU

Componentes	Características	Fontes de geração
Resíduos alimentares	Muito úmido, putrescível, rapidamente degradável, compressível	Restaurantes, Residências, Lanchonetes, etc.
Papel, trapo	Seco a úmido, compressível, degradável, inflamável	Comercio, residências, indústrias, etc.
Resíduos de jardinagem	Úmido, putrescível, degradável, inflamável	Residências, parques e praças, hortos
Plásticos	Seco, compressível, pouco degradável, inflamável	Indústrias, comércios, residências, etc.
Metais ocos	Seco, corrosível, pode ser amassado	Restaurantes, indústrias, comércio, etc.
Metais maciços	Seco, fracamente corrosível, rígido	Indústrias, construções, etc.
Borracha	Seco, inflamável, compressível, não pode ser amassado, pouco degradável	Indústrias, oficinas, comércio, etc.
Vidro	Seco, pode ser esmagado, pouco degradável	Industriais, residências, comércio, etc.
Madeiras e espumas	Seco, pode ser amassado, compressível, degradável, inflamável	Madeireiras, residências, feiras, comércios, etc.
Entulho de construção	Úmido, pode ser amassado, erodível, pouco degradável	Construções, residências, etc.
Cinzas, pó	Úmido, possui características de solo, compressível, pode ser ativo quimicamente e parcialmente solúvel	Cemitérios, indústrias, cerâmicas, madeireiras, etc.

Adaptado de: Sowers (1973) *apud* Boscov (2008)

Estima-se que diversos problemas socioambientais podem estar relacionados com a ausência de um gerenciamento integrado de resíduos que envolva atividades desde a geração até a disposição final, sem esquecer da carência de programas de educação ambiental ou de conscientização da população. Acredita-se que a partir do momento em que estes problemas urbanos estejam solucionados, mesmo que parcialmente, já seja possível perceber reflexos positivos na qualidade de vida da população, saúde pública e conservação dos recursos naturais.

3.2. Disposição final dos RSU em aterros sanitários.

Muitos municípios adotam o aterro sanitário como alternativa principal para a disposição dos RSU e parte final do seu sistema de gerenciamento integrado de resíduos, uma vez que os aterros sanitários, quando bem planejados e gerenciados, obedecendo a todos os critérios e

normas de engenharia, permitem um confinamento seguro dos RSU, minimizando os efeitos dos impactos ambientais associados ao descarte de RSU, garantindo o controle da poluição ambiental e conseqüentemente proteção à saúde pública.

Segundo a ABNT (1997) o local definido para implantação de aterros sanitários deve ser aquele que o impacto ambiental decorrente de sua operação seja minimizado, haja a maximização da aceitação popular, onde a implantação esteja de acordo com o zoneamento da região, onde o aterro opere por longos períodos e necessite apenas de poucas obras no início de sua operação. Outras considerações apontadas por Boscov (2008) compreendem baixa densidade populacional, proximidade da fonte geradora, vias de acesso e transporte adequado, baixo índice de precipitação, pouca declividade e distância razoável de qualquer fonte de abastecimento de água.

Em muitos municípios baianos há dificuldades na definição de um espaço apropriado para implantação de um aterro sanitário, todavia, os maiores problemas para construção se dão pela carência de mão de obra local especializada para desenvolver, planejar, executar e gerenciar estes aterros. Isso sem contar com problemas de caráter socioeducativo, uma vez que, grande parte da população baiana não possui conhecimentos sobre a forma adequada do descarte dos seus resíduos e as conseqüências desse descarte inapropriado.

Alguns objetivos e metas precisam ser alcançados quando se deseja identificar uma área propícia para instalação do aterro, são eles:

- Definição de espaços localizados fora de áreas de restrição ambiental, aquíferos menos permeáveis, solos mais espessos e menos sujeitos aos processos de erosão e escorregamentos, além de possuir declividade apropriada e distância de habitações, cursos d'água, rede de alta tensão;
- Implantação e manutenção de um sistema de gerenciamento integrado, com estrutura logística bem definida, e processos interligados de forma a proporcionar a maximização da vida útil do empreendimento, máxima capacidade de recebimento de resíduos e separação total dos recicláveis.
- Baixos custos de instalação e operação do aterro: menores gastos com infraestrutura, menor distância da zona urbana geradora dos resíduos e disponibilidade de material de

cobertura.

- Aceitabilidade social, através da menor oposição da comunidade vizinha.

Alcançando-se as metas acima listadas, deve-se então efetuar um estudo mais aprofundado da área pretendida, abrangendo os aspectos e impactos do empreendimento, levantamento dos dados geológicos, geomorfológicos, hidrológicos além de dados sobre o clima.

Diversas são as formas de se projetar e operar um aterro sanitário. Todavia independe do projeto concebido, eles devem ser monitorados e controlados de forma a não permitir a disponibilidade de contaminantes para o meio ambiente, seja por meio terrestre, aquático, aéreo ou pela fauna. Por isso seus projetos visam a reduzir as possibilidades de poluição das águas superficiais e subterrâneas, do solo, ar e eliminar os potenciais impactos adversos na cadeia alimentar.

Os poluentes provenientes de um aterro podem ser relacionados direta ou indiretamente com os resíduos em decomposição, que por sua vez originam percolados (chorume), gases, massas pastosas e efluentes.

Para controlar a possível migração de percolados ou gases, os aterros sanitários dispõem de recursos, tais como: sistemas de drenagem de chorume, barreiras impermeáveis naturais (argilas) ou artificiais (mantas impermeabilizantes), sistema de captação de gás, queimadores e/ou flares, etc.

Todo projeto de aterro deve também prever medidas que:

- Controlem erosões superficiais;
- Possibilitem a integridade das camadas impermeáveis e drenantes;
- Atuem sobre o alívio das pressões;
- Minimizem a ação de odores;
- Controlem proliferação de vetores,
- Permita a coleta do escoamento superficial; e,

- Garantam a estabilidade dos taludes/ maciços.

Segundo Boscov (2008) e o Manual de Operação de Aterros Sanitários da Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia (CONDER), aqui no Brasil, é obedecida a seguinte sequência construtiva e operacional num aterro sanitário:

- A área de disposição é recoberta com um revestimento de base, geralmente composto por camadas que permitam a drenagem e impermeabilização;
- A construção das camadas de RSU é feita em rampas, onde o resíduo é descarregado dos caminhões no pé desta rampa e com o auxílio máquinas robustas (trator esteira, compactadores, etc.) esse resíduo é espalhado e compactado;
- É efetuada a cobertura com camadas de solo e/ou mantas específicas;
- Cada célula de disposição é trabalhada até atingir a cota máxima de trabalho, que varia de acordo com as características do projeto e estabilidade do maciço;
- As células são revestidas na base, topo e laterais, havendo no mínimo uma drenagem na base.
- Toda célula que passa pela junção ou sobreposição deve estar com o processo de decomposição do resíduo em estado avançado e/ou maduro;
- O topo do aterro geralmente recebe um sistema de impermeabilização superior ou uma cobertura final, composta por camadas de drenagem e impermeabilização. Esse sistema é composto por canaletas e drenos.

3.3. Impactos ambientais associados a disposição inadequada dos RSU

Diversas pesquisas apontam uma série de problemas causados direta ou indiretamente pela disposição inadequada dos RSU, isso muito em função de sua composição extremamente heterogênea, podendo conter desde materiais orgânicos até compostos químicos perigosos, sem contar com agentes patogênicos.

Quando estes RSU não são tratados ou dispostos de forma adequada, alguns impactos ambientais adversos podem ser originados ou potencializados, tais como:

- Contaminação do solo: seja pela decomposição do resíduo, pela ação de animais ou micro-organismos, ou ainda pela ação do chorume;
- Contaminação de águas superficiais e/ou subterrâneas: ação do chorume, arraste de materiais via águas pluviais, ação de compostos químicos, etc.;
- Contaminação do ar: resultante do gás gerado durante a decomposição dos resíduos, ou pela queima descontrolada dos resíduos;
- Propensão de vetores de doenças: agentes patogênicos, animais, etc.;
- Poluição visual.

Além destes, diversos outros impactos ambientais podem ser relacionados com a segregação, coleta, transporte, disposição e decomposição dos resíduos, uma vez que muitos são os fatores que afetam os impactos ambientais oriundos dos sistemas de gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos, tornando difícil uma comparação direta entre todas as alternativas. Análise do Ciclo de Vida (ACV) tem se apresentado como uma alternativa promissora quando se deseja realizar comparações de desempenho entre os diversos sistemas disponíveis, uma vez que, a ACV considera e quantifica todas as consequências ambientalmente relevantes oriundas do produto, sistema ou processo, durante toda a sua vida (BARLAZ *et al.*, 2003).

Baseado na aplicação da ACV, Mendes *et al.* (2004) concluíram que o uso de aterros como opção de tratamento/disposição confere um maior impacto ambiental que a incineração, uma vez que, quando operado de maneira arbitrária pode contribuir substancialmente para o aquecimento global, em função da grande emissão de metano, maior poder de acidificação do solo e de contaminação da água, em função da enorme quantidade de contaminantes que são originados no processo de decomposição do RSU.

Entretanto, quando os resíduos biodegradáveis são direcionados para a compostagem ou biogásificação e apenas os outros resíduos são destinados ao aterro, observa-se uma significativa redução dos impactos ambientais, uma vez que a compostagem reduz o volume dos resíduos de 50 a 85%, aumentando assim a vida útil dos aterros (SHARHOLY *et al.*,

2008).

3.4. Processos microbiológicos e a eficiência da degradação dos RSU em aterros.

Quando dispostos em aterros sanitários, os RSU passam por processos naturais de degradação, sejam eles aeróbios (com oxigênio) ou anaeróbios (ausência de oxigênio). No ASMC esse processo microbiológico ocorre em meio anaeróbio, no qual as bactérias convertem massa biodegradável em dióxido de carbono, água e compostos complexos precursores do metano, acetato e hidrogênio, resultando em matéria orgânica bioestabilizada.

Segundo Jardim (2000), a estabilização do resíduo orgânico através de processos anaeróbios é lenta e pode acarretar no aumento do potencial de produção de chorume e elevação dos níveis de gás metano produzido. Todavia dados coletados durante a operação do ASMC apontam para a geração de metano já nas primeiras semanas em que o RSU é disposto no aterro, de forma a permitir que os drenos utilizados para captação do biogás, que são instalados concomitantemente com a frente de operação, detectem a presença de metano (com concentrações em torno de 10%), fornecendo assim o indicativo de início da fase ácida. (MACHADO *et al.*, 2008).

No processo anaeróbio a biodegradação apresenta cinco fases de estabilização de resíduos orgânicos (Quadro 3.2): aeróbia, transição, ácida, metanogênica e fase de regressão. A duração de cada fase irá variar de acordo com a distribuição dos componentes orgânicos na célula do aterro, da disponibilidade dos nutrientes, do teor de umidade dos resíduos e do grau de compactação dos resíduos (TCHOBANOGLOUS *et al.* 1993). Ainda segundo estes autores, este é um modelo qualitativo que deve ser usado em separado para diferentes áreas do aterro, uma vez que o tempo para completar o enchimento de um aterro é muito longo, podendo ocorrer as cinco fases de biodecomposição simultaneamente, em diferentes setores do aterro, conferindo uma composição média ao chorume e ao biogás.

Quadro 3-2 Características das fases da digestão anaeróbia dos RSU

Fase	Período típico		Condição	Período Típico
	Início	Duração		
I	10 a 15 dias	Horas a 1 semana	Aeróbia	Como o oxigênio presente nos espaços vazios dos RSU se mistura com o oxigênio dissolvido nos resíduos (associado a uma determinada umidade) há uma promoção da aceleração do processo de decomposição aeróbia, originando assim dióxido de carbono, água, nitrogênio e calor.
II	40 a 60 dias	1 a 6 meses	Fase de transição ou fase anaeróbia não metanogênica	Inicia o esgotamento do oxigênio, além da mudança de comportamento do nitrato e do sulfato, que começarão a atuar como receptores de elétrons nas reações de conversões biológica acarretando na formação das condições anaeróbias e contribuindo para uma curta geração de hidrogênio.
III	6 a 12 meses	3 meses a 3 anos	Fase ácida ou Anaeróbia metanogênica instável	Ocorre a aceleração da atividade microbiana muito em função da produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e quantidades menores de hidrogênio. Durante a hidrólise ocorre a transformação dos compostos de maior peso molecular (lipídeos, polissacarídeos, proteínas e ácidos nucleicos) em compostos apropriados para uso de microrganismos como fonte de energia e carbono. Já na acidogênese, começa a conversão microbiológica dos compostos resultantes da hidrólise em compostos intermediários de peso molecular menor, exemplificado pelo ácido acético e pequenas concentrações de outros ácidos orgânicos mais complexos. (TCHOBANOGLIOUS <i>et al.</i> 1993).
IV	12 a 24 meses	8 a 40 anos	Anaeróbia metanogênica estável	Os microrganismos predominantes são estritamente anaeróbios e produzem metano e dióxido de carbono a partir de ácidos acético e hidrogênio. Há uma constância nas taxas de produção e composição dos gases produzidos, em média 50% de metano e 50% de dióxido de carbono.
V	24 a 60 meses	1 a 40 ou mais anos	Facultativa alcalinogênica – maturação final, ou metanogênica declinante.	A taxa de geração de gás no aterro diminui significativamente, devido ao fato de que a maioria dos nutrientes disponíveis já ter sido removida durante as lixiviações anteriores e os substratos restantes serem lentamente biodegradáveis. Dependendo das medidas de encerramento da célula de disposição de RSU, pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio podem ser encontradas no aterro. Durante esta fase, o lixiviado, na maioria das vezes, contém ácidos húmicos e fúlvicos que são biologicamente difíceis de serem decompostos (TCHOBANOGLIOUS <i>et al.</i> 1993).

Cintra (2009) apresentou um paralelo entre os diversos modelos utilizados para descrever o processo de degradação de resíduos sólidos em aterros sanitários. Essa análise comparativa está apresentada no Quadro 3-3.

Quadro 3-3 Fases de estabilização do percolado em aterro.

Autores	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
REES (1980) <i>apud</i> LIMA (1988)	<p>FASE AERÓBIA</p> <ul style="list-style-type: none"> - curta duração - baixo teor de oxigênio - carga orgânica alta - elevação de temperatura - produção de CO₂, água e calor. - dissolução de sais muito solúveis (NaCl) dos resíduos, pelo chorume presente. 	<p>FASE ANAERÓBIA NÃO METANOGÊNICA</p> <ul style="list-style-type: none"> - produção máxima de ácidos voláteis - início da produção de metano - picos máximos de produção de CO₂ e de H₂ (1 a 6 meses – EUA) 	<p>FASE METANOGÊNICA INSTÁVEL</p> <ul style="list-style-type: none"> - caracterizada pela variação crescente da produção de metano - hidrogênio desaparece devido à velocidade de utilização das bactérias metanogênicas (3 meses a 3 anos – EUA) 	<p>FASE METANOGÊNICA ESTÁVEL</p> <ul style="list-style-type: none"> - caracterizada pelo equilíbrio entre as bactérias formadoras de ácidos voláteis e de metano. - a produção de metano é estável, bem como a dos demais gases e suas respectivas taxas de utilização. (8 a 40 anos – EUA) 	<p>FASE REGRESSIVA</p> <ul style="list-style-type: none"> - queda gradativa da produção de metano e CO₂ e a gradual entrada de ar no meio (O₂ e N₂) (1 a 40 anos, ou mais – EUA).
POHLAND <i>et al.</i> (1985)	<p>FASE DE AJUSTAMENTO INICIAL</p> <p>Mesmas características do modelo anterior e término no início da produção de CO₂</p>	<p>FASE DE TRANSIÇÃO</p> <p>Início na formação de chorume e produção de ácidos voláteis.</p>	<p>FASE DE FORMAÇÃO DE ÁCIDOS</p> <p>Predominância de ácidos voláteis no chorume (grande diferença em relação ao modelo de REES, 1980).</p>	<p>FASE METANOGÊNICA ESTÁVEL</p> <p>Consenso quanto à nomenclatura e duração ao modelo de REES (1980)</p>	<p>FASE REGRESSIVA</p> <p>Consenso quanto à nomenclatura e duração ao modelo de REES (1980)</p>
PINTO (2000)	<p>FASE AERÓBIA</p> <ul style="list-style-type: none"> - ajustamento inicial quando os componentes orgânicos biodegradáveis dos resíduos sólidos começam a sofrer a decomposição microbiana, logo após a deposição no aterro, em condições aeróbias. - oxigênio e nitrato são 	<p>FASE ANAERÓBIA ÁCIDA</p> <p>1ª. Etapa – HIDRÓLISE</p> <p>Redução de nitrato e sulfato à N₂ e H₂S.</p> <p>Aceleração das atividades microbianas, com produção significativa de ácidos carboxílicos. Queda de pH (<6,0).</p> <p>Hidrólise enzimática dos</p>	<p>FASE ACELERADA DE PRODUÇÃO DE METANO</p> <ul style="list-style-type: none"> - conversão de ácido acético e H₂ a CH₄ e CO₂ pelas <i>archaea</i> metanogênicas - a taxa de produção de metano eleva-se gradualmente com a concomitante redução da concentração de ácidos orgânicos e elevação do pH 	<p>FASE DE PRODUÇÃO DESACELERADA DE METANO</p> <ul style="list-style-type: none"> - ocorre após a matéria orgânica facilmente degradável ter sido convertida a CH₄ e CO₂ - caracteriza-se pelo decréscimo da taxa de produção de CO₂ e CH₄, (40 a 60%), pela redução da concentração de ácidos. 	

Quadro 3-3 Fases de estabilização do percolado em aterro.

Autores	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
	<p>consumidos - açúcares solúveis servem de fontes de carbono para as atividades microbianas - o gás será composto praticamente de CO₂ - o pH (~7,0) cai rapidamente com o consumo de O₂ e inicia-se a fermentação</p>	<p>compostos de massas moleculares mais elevadas (lipídios, proteínas e polissacarídeos), formando compostos mais simples (açúcares, aminoácidos, ácidos graxos), utilizados como fonte de energia.</p> <p>2^a. Etapa – ACIDOGÊNESE Os compostos mais simples da fase anterior são convertidos a outros intermediários (ácidos acético, propiônico, butírico, CO₂) e H₂ (acidogênese).</p> <p>3^a. Etapa – ACETOGÊNESE Os compostos intermediários são convertidos a H₂, ácido acético e CO₂ (principal da fase). O pH do percolado cai para valores próximos a 5,0. A DQO solúvel e a condutividade do percolado aumentam significativamente, devido à dissolução dos ácidos orgânicos no percolado.</p>	<p>para valores entre 6,2 e 7,9. A produção de metano chega a atingir o seu limite máximo de 50 a 70% em volume - ocorre pouca hidrólise de sólidos - ocorre pouca mudança nas populações anaeróbias (maior nível das metanogênicas)</p>	<p>Carboxílicos (<100 mg/L), provocando um aumento do pH do sistema. A produção de metano é controlada pela hidrólise de sólidos, pois nessa fase não há muita disponibilidade de substrato solúvel (ácidos carboxílicos acumulados). - a taxa de decomposição da celulose e hemicelulose é maior que das fases anteriores</p>	

Adaptado de: Cintra (2009)

Com base nas informações descritas no Quadro 3-3 observa-se a similaridade existente entre os modelos descritos por Rees (1980) *apud* Lima (1988) e Pohland *et al* (1985), havendo divergências mínimas no comportamento da Fase II.

Já o modelo apresentado por Pinto (2000) apresenta quatro fases (aeróbia, anaeróbia ácida, fase acelerada de produção de metano e fase desacelerada de produção de metano) com um maior nível de detalhamento do comportamento esperado em cada uma dessas fases. A divergência principal deste modelo quando comparado ao de Pohland *et al* (1985) está na divisão entre as fases ácidas e metanogênicas, onde para Pohland elas ocorrem em 3 momentos distintos, enquanto Pinto aposta em 2 momentos.

Para Vazoller (1999), a natureza da gênese do metano em etapas, a partir de compostos orgânicos complexos, descreve a importância das interações microbianas que buscam evitar o acúmulo de ácidos orgânicos e alcoóis no meio em fermentação.

Um ponto comum em todos os modelos é a afirmativa de que diversos fatores podem influenciar na taxa de biodegradação quando estas ocorrem em campo. A exemplo, temos o clima, que é um dos aspectos críticos da pesquisa em questão, principalmente pelo fato do ASMC está situado numa cidade de clima tropical, já que as bactérias metanogênicas são mais sensíveis do que as acidogênicas ao clima.

Os principais fatores que podem influenciar na digestão anaeróbia são:

- **pH:** De acordo com Barbosa e Torres (1999), o pH ótimo ao crescimento bacteriano é bem definido, servindo de base para a classificação dos microrganismos em acidófilos, neutrófilos ou basófilos. Todavia algumas espécies se adaptam a diferentes valores, sendo capazes de manter o pH intracelular em torno de 7,5 porque possuem tampões naturais e efetuam trocas de íons de hidrogênio com o meio externo (Bidone, 2001). As bactérias metanogênicas são as mais sensíveis à variação do pH. A faixa ótima de pH para o pleno desenvolvimento deste grupo varia de 6,5 a 7,6.
- **Temperatura:** De forma bem parecida ao que acontece com o pH, há uma faixa de temperatura ótima, onde as bactérias podem crescer. Na temperatura ótima as enzimas bacterianas estão na forma mais ativa. Na temperatura mínima as enzimas trabalham com menor eficiência, portanto o processo de conversão da matéria orgânica em

metabólitos é mais lento. Já na faixa máxima, ocorre a desnaturação das proteínas (destruição do arranjo molecular) causando a morte celular (BARBOSA e TORRES, 1999). Markovich e Petrova, (1966), citam que as bactérias metanogênicas podem atuar em duas faixas distintas de temperatura: a mesofílica que varia de 29 a 45 °C e a termófila que vai de 45 a 70°C.

- **Teor de umidade:** representa a quantidade de água presente nos RSU, geralmente expresso base seca ou base úmida. Destaca-se que o teor de umidade dos RSU pode sofrer alterações em função das estações do ano ou em função do índice pluviométrico (TCHOBANOGLIOUS *et al.*,1977). Essa característica é importante uma vez que se relaciona com outras características, como massa específica e poder calorífico, afetando o gerenciamento dos resíduos, principalmente no caso da incineração. Os componentes orgânicos do RSU geralmente concentram a maior parcela de umidade, seguido pelos papéis e papelões, trapos, couros, e por fim, os inertes e finos, (LIMA e NUNES, 1994).

3.5. Geotecnia em aterros sanitários.

Quando se acompanha a operação e funcionamento de um aterro sanitário deve-se atentar para os aspectos geotécnicos relacionados aos maciços de resíduos, uma vez que, inúmeros problemas podem surgir em função dos deslocamentos do maciço, aumento da pressão interna das células, formação de bolhas de ar, bolsões de material líquido, etc.

Como os RSU possuem características distintas em função da localização, aspectos culturais e climáticos, dificilmente ocorrerá uma similaridade nesses problemas, caso sejam comparados dois ou mais aterros no Brasil. Portanto, tornam-se necessários estudos mais aprofundados sobre as propriedades mecânicas dos RSU, principalmente no que tange a compressibilidade e resistência ao cisalhamento.

A sistemática de monitoramento geotécnico se baseia principalmente no controle de deslocamentos verticais, também chamado de recalques, e horizontais, por meio de marcos superficiais, placas de recalques, controles de níveis de chorume e pressão dos gases (piezômetros), além do controle de vazões drenadas de percolados e gases. Com base nesses dados de campo é possível proceder com análises de estabilidade e recalques, visando à

garantia da estabilidade do aterro durante sua vida útil, (BOSCOV, 2008).

Melo (2003) considera os recalques que ocorrem na massa de RSU um aspecto de especial importância prática e bastante citado como um dos principais problemas operativos, uma vez que os recalques não só repercutem nos aspectos estruturais da obra, mas também no que diz respeito ao aproveitamento do volume. O autor destaca ainda que entender a evolução dos recalques diferenciais, também é de suma importância, pois estes podem causar danos a uma cobertura corretamente projetada e construída, bem como ao sistema de drenagem. Segundo Moreda (2000) tais recalques podem gerar instabilidades na massa de RSU e/ou deslizamentos de taludes.

Nos aterros sanitários podem ocorrer basicamente três tipos de recalques:

- Imediatos ou elásticos: Como a compressão imediata ou inicial é o resultado de pressões externas impostas por máquinas compactadoras, no instante inicial da disposição, dependendo do equipamento utilizado e, da densidade que se quer conseguir, o recalque imediato será mais expressivo, ou não (MOREDA, 2000). O autor ainda comenta que o recalque imediato não apresenta relação alguma com a biodegradação, haja vista que ele é instantâneo.
- Primários: que ocorrem devido à expulsão de líquidos e gases do interior da massa de RSU, ou seja, dos espaços preenchidos por estes fluidos. Isso tem sido considerado como um processo de consolidação com um baixo valor de saturação do RSU e alta condutividade do chorume e/ou gases. Sob condições não saturadas, como pode ser esperado em locais com RSU recente, a compressão primária ocorre rapidamente (BJARNGARD e EDGERS, 1990), sendo difícil distingui-la da compressão secundária.
- Secundários: que ocorrem principalmente devido a fluência e a biodegradação e se prolongam com o tempo, estando relacionados com o decaimento biológico e o progressivo recomodamento da estrutura dos RSU (MOREDA, 2000).

Kaimoto e Abreu (1999) *apud* Boscov (2008) sugeriram uma metodologia para análise da estabilidade dos maciços em aterros sanitários baseada no monitoramento geotécnico. Esta metodologia consiste em:

- Estabelecimento do modelo inicial de comportamento mecânico, englobando processos e as etapas operacionais, além da distribuição das pressões neutras;
- Verificação das condições de estabilidade – teste das hipóteses;
- Implantação sequenciada de instrumentos capazes de medir as pressões neutras e de deslocamento;
- Análise conjunta do comportamento teórico e de campo.

3.5.1. Monitoramento de recalques e deslocamentos horizontais

O monitoramento geotécnico em diversos aterros no Brasil é realizado periodicamente com base nos marcos superficiais e piezômetros (Figuras 3-1 e 3-2 respectivamente).

Denomina-se marco superficial o elemento de concreto (geralmente pré-moldado) com pino de metal engastado em sua face superior, instalado na superfície do aterro. Com base no seu deslocamento é possível determinar os deslocamentos dos maciços das células do ASMC.



Figura 3-1– Registro fotográfico marco superficial antes da instalação no ASMC.

Fonte: A autora.



Figura 3-2 - Registro fotográfico piezômetro câmara dupla instalado no ASMC.

Fonte: A autora.

Quando o deslocamento é no sentido vertical, denominamos o movimento de recalque, que é obtido através da diferença entre os valores da cota atual e da inicial, ou, entre a diferença dos valores da cota atual e o da última leitura obtida. Já o deslocamento horizontal é calculado

através das leituras das coordenadas Leste e Norte.

Diversos fatores contribuem para os recalques, tais como:

- Decomposição bioquímica dos RSU;
- Ações mecânicas (compactação, peso próprio, sobrecargas, etc.) e,
- Percolação de líquidos contribuindo para a reorientação/movimentação de partículas menores e para a mudança nas tensões efetivas entre as partículas do RSU .

Entretanto outros fatores contribuem para a magnitude e conseqüentemente velocidade do recalque, são eles:

- Altura do aterro;
- Umidade e temperatura;
- Presença de gases;
- Nível e flutuação de chorume;
- Índice de vazios e materiais degradáveis.

A necessidade de se estudar as propriedades mecânicas dos RSU é ampliada quando se deseja reaproveitar áreas já utilizadas no aterro, principalmente quando não é conhecida a capacidade de carga dos maciços, que é geralmente reduzida e dependente dos métodos construtivos, composição e densidade dos RSU e espessura do solo utilizado na cobertura dos RSU.

Semelhante aos problemas geotécnicos tradicionais que ocorrem em taludes, nos aterros sanitários as rupturas nos maciços podem ocorrer na massa de RSU, na cobertura do aterro, no solo de fundação, na base do talude, nas interfaces ou ainda no sistema de isolamento da trincheira de ancoragem.

3.5.2. Monitoramento do nível d'água e percolados.

É comum encontrar diversos níveis de percolados nas células do aterro sanitário, principalmente em profundidades variadas. Isso é muito em função das configurações das células sobrepostas, assim como em função da própria compactação do RSU e da geração de gases. É sabido que as pressões neutras de gás e percolados nas células tendem a ser independentes em células adjacentes, uma vez que há uma separação através de coberturas intermediárias e junções.

Para medir as pressões neutras em níveis diferentes, quando há um estrato de baixa permeabilidade em subsuperfície, utilizam-se piezômetros multiníveis, conforme apresentado na Figura 3-2. Quando se deseja medir o nível d'água ou de percolado pode-se utilizar um indicador de nível.

3.6. Aproveitamento energético dos RSU

Como já explanado, a disposição final dos RSU é um dos principais problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos no Brasil. A emissão descontrolada do biogás oriundo dos processos de decomposição da matéria orgânica dos aterros ameaça o ambiente local, produz odores desagradáveis, causa danos à vegetação, pode causar explosões, além de agravar o efeito estufa, uma vez que o metano produzido é 21 vezes mais nocivo que o dióxido de carbono.

Uma das formas mais simples de utilização do biogás produzido em aterros sanitários está associada à conversão energética. Composto em percentual molar de 40 a 55% de metano, 35 a 50% de dióxido de carbono, e de 0 a 20% de nitrogênio, o biogás pode ser convertido em formas de energia úteis tais como: eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular ou para abastecer gasodutos com gás de qualidade. Todavia a presença de água, gás sulfídrico e dióxido de carbono no biogás torna o processo de queima menos eficiente, e exige que o biogás passe por um processo de purificação e de retirada de umidade, para evitar a corrosão dos equipamentos e melhorar a queima.

De acordo com o balanço energético nacional 2012, apresentado pela Empresa de Energia Elétrica (EPE) e o Ministério de Minas e Energia (MME), a participação de fontes renováveis

na produção de eletricidade ampliou-se em 2,5 pontos percentuais em 2011, atingindo 88,8%, conforme pode ser observado na Figura 3-3.

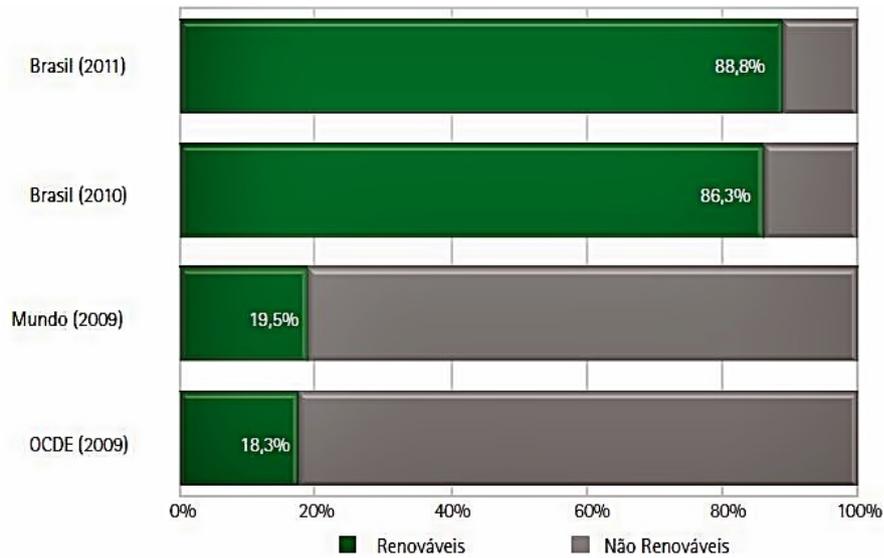
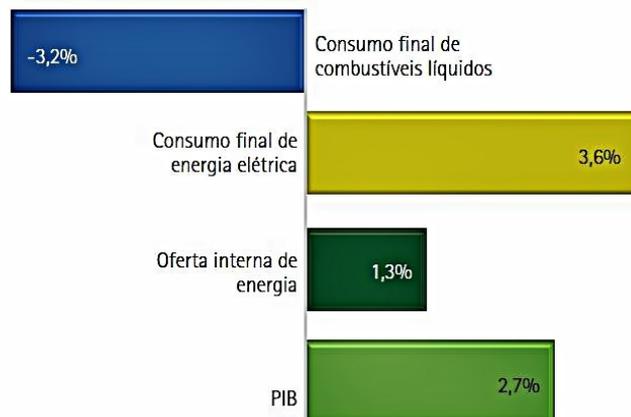


Figura 3-3 – Participação de fontes renováveis na matriz elétrica.

Fonte: EPE; Agência Internacional de Energia. Elaboração: EPE

Todavia, apesar de positivos, os resultados apresentados merecem atenção especial, isso porque o consumo de energia elétrica cresce mais que a oferta interna de energia (vide Figura 3-4).

Crescimento % 2011/2010



*Nota: Combustíveis líquidos e eletricidade correspondem a cerca de 64% do consumo final de energia

Figura 3-4 – Crescimento do consumo de energia elétrica e PIB.

Fonte: EPE; Agência Internacional de Energia. Elaboração: EPE

Assim, projetos que envolvam a recuperação do biogás produzido em aterros são cada vez mais valorizados, uma vez eles possibilitam o aproveitamento da energia contida nos RSU. Cada unidade de aproveitamento dos gases em aterros possui particularidades dependentes das necessidades energéticas locais, do investimento financeiro disponível e da legislação vigente, sendo importante a realização de uma avaliação prévia das diversas opções de aproveitamento antes de uma decisão final para o projeto.

No Brasil ainda é tímido o número de projetos de recuperação dos gases de aterros sanitários. Um desses projetos é relatado por Danese (1981), que cita o projeto da Companhia de Gás de São Paulo (COMGAS), que distribuía o gás de um aterro sanitário para um conjunto residencial próximo ao local. Outro é apontado por Ploutakhina (2001), que é o do ASMC, denominado de Termoverde. A Termoverde, inaugurada em março de 2011, foi a primeira usina termoelétrica a biogás do nordeste, e a terceira deste tipo no Brasil. Ela coleta e processa os gases metano e dióxido de carbono gerados pela decomposição do RSU.

3.7. Estimativas da geração de biogás em aterros sanitários

Na literatura são encontrados diversos modelos que auxiliam nas estimativas de produção de biogás em aterros. Eles podem ser do tipo:

- Reduzido: que consiste na construção de uma célula fechada no aterro/campo que servirá para representar as condições do aterro, para posteriores análises do biogás. Neste caso o cálculo do total da emissão é baseado na quantidade de gás produzido pelo volume de RSU utilizado;
- Intuitivos: que adotam parâmetros pré-definidos para estimar o volume de metano emitido em aterros. Apresenta fragilidade e um maior grau de imprecisão devido à sazonalidade climática, ao conteúdo de matéria orgânica, tipo de resíduo disposto, operação do aterro, dentre outros fatores; e
- Numéricos: que se utiliza de métodos quantitativos para determinação do potencial. Sendo mais precisos que os demais. Oonk e Boom (1995) *apud* Ensinas (2003) apresentam alguns destes métodos de estimativas de produção de biogás em aterros descritos nas Equações 3-1 a 3-4:

Modelo ordem zero:	$\alpha t = \xi 1,87 k_0 A$	(Equação 3-1)
Modelo de primeira ordem:	$\alpha t = \xi 1,87 A C_o k_1 e^{-k_1 t}$	(Equação 3-2)
Modelo multi-fase:	$\alpha t = \xi \sum_{j=1}^3 11,87 A C_{o,i} k_{1,i} e^{-k_{1,i} t}$	(Equação 3-3)
Modelo de segunda ordem:	$\alpha t = \xi 1,87 A k_2 (C_o / k_2 C_{ot+1})^2$	(Equação 3-4)

Sendo:

αt : formação do gás (m³/ano)

ξ : fator de geração que indica a fração do RSU que é convertida em biogás.

k_n : parâmetros do modelo

A: quantidade de RSU depositada no local (kg)

C_o : quantidade de carbono orgânico degradável no RSU (kg de C/ kg de RSU)

$C_{o,i}$: quantidade de carbono nas frações de degradação rápida, moderada e lenta (kg de C/kg de RSU)

t: tempo desde a deposição do RSU (anos)

A constante 1,87 é sugerida indicando o volume de biogás gerado por um kg de RSU em m³.

De acordo com a CETESB/SMA (2003), existem diferentes métodos utilizados no cálculo da quantidade de metano gerado em aterros, desde os que apresentam uma aproximação grosseira (considerando somente a quantidade de RSU disposta no aterro), até métodos que considerem uma cinética de geração de biogás em função das condições climáticas locais, concentração de nutrientes no solo e composição do resíduo.

Possivelmente um dos métodos mais utilizados para estimativa da geração de gás em aterros é o Método de Decaimento de Primeira Ordem I (USEPA 2, 1998; IPCC, 1996). Tal metodologia considera a geração de metano por uma quantidade de resíduo depositada no ano x durante os anos posteriores.

Considerando que a cada ano vigente novas quantidades de RSU serão depositadas, a quantidade de metano gerada em um determinado ano será igual à geração do resíduo depositado no ano T somada às gerações dos resíduos depositados nos anos anteriores, referenciadas no ano T , conforme apresentado na equação 3-5 (CETESB/SMA, 2003).

Como o resíduo disposto anualmente (R_x) é variável dependente de fatores como a taxa de crescimento populacional, taxa de RSU produzido por habitante ao ano e da porcentagem de resíduos que é coletada e disposta no aterro, à multiplicação de todos esses fatores originarão os valores de R_x .

$$Q_T = F \cdot R_x \cdot k \cdot L_0 \cdot e^{-k(T-x)} \quad (\text{Equação 3-5})$$

Sendo:

Q_T = metano gerado no ano T [m³/ano];

F = fração de metano no biogás [%];

R_x = quantidade de resíduo depositado no ano x [kg];

k = constante de decaimento [ano⁻¹];

L_0 = potencial de geração de biogás [m³ de biogás/kg RSU];

T = ano atual;

x = ano de deposição do resíduo.

Segundo Machado *et al.* (2009) o modelo da EPA faz uso de dois parâmetros básicos: a) o potencial de geração de metano (L_0); b) a constante de decaimento (ou taxa constante de geração de CH₄ por ano) que pode ser afetada por fatores relativos à composição do RSU, às condições climáticas do local onde o aterro está implantado, características inerentes ao aterro, práticas de disposição dos resíduos, dentre outros.

Desta forma, Machado *et al.* (2009) propõe um procedimento simplificado, amplamente utilizado nas pesquisas de geração de metano nas células de RSU do ASMC, visando à estimativa do L_0 e do k , considerando dados obtidos através da caracterização do RSU do aterro associados aos valores da fração biodegradável propostos por Lobo (2003).

Para obtenção do valor de k , Machado (2009) recomenda utilizar a Equação 3-6, fazendo uso de valores de L_0 relativos às amostras de resíduos de diferentes idades e/ou tempos de aterramento.

$$\frac{\partial \theta(\square)}{\partial t} = \square - \square \cdot \square \quad (\text{Equação 3-6})$$

Há também um outro método baseado na quantificação direta do L_0 e estimativa de k bastante difundido em escala laboratorial: o Potencial Bioquímico de Metano (BMP). O BMP é medido utilizando-se variados modelos cuja abordagem básica consiste na incubação anaeróbia de pequena quantidade de RSU em conjunto com chorume, que através de

dispositivos e/ou equipamentos permite medir simultaneamente o volume de biogás e a sua composição (HANSEN *et al*, 2004).

Maciel (2009) relata que apesar de usual o BMP não possui uma sistemática normatizada, e que esta condição se dá em função da variabilidade dos RSU e a complexidade do processo amostral. Palmisano e Barlaz (1996) *apud* Carvalho (2013) afirmam que a variação dos componentes microbiológicos dos RSU e do chorume, produz uma oscilação dos aspectos bioquímicos e físico-químicos (que estão diretamente relacionados e são responsáveis pela quantificação do biogás gerado). Tal afirmativa pode ser percebida através dos dados apresentados na Tabela 3-1, a seguir.

Tabela 3-1 - Valores para BMP encontrados na literatura.

Autores (ano)	Tipo de Resíduo	Resíduo (anos)	Potencial de Biogás/Metano
Barlaz <i>et al.</i> (1997)	Gramma	0	144,4 mL CH ₄ / g MS
	Folhas		30,6 mL CH ₄ / g MS
	Ramos		62,6 mL CH ₄ / g MS
	Resto de alimentos		300,7 mL CH ₄ / g MS
	Papel revestido		84,4 mL CH ₄ / g MS
	Jornal		74,3 mL CH ₄ / g MS
	Papelão		152,3 mL CH ₄ / g MS
Vazoller (2001)	Papel escritório		217,3 mL CH ₄ / g MS
	Resíduos Sólidos	0	91NL/Kg SV
Mehta <i>et al.</i> (2002)	Resíduos Sólidos	3 - 4	0 a 83,6 Nm ³ CH ₄ /t MS
Bayard <i>et al</i> (2005)	Resíduos Orgânicos	0 - 2	194 a 229 NL CH ₄ /kg MS
Alves (2008)	Resíduos Orgânicos	0	57,8 Nm ³ CH ₄ /t STV
Maciel (2009)	Resíduos Sólidos	0 - 7	18,3 a 462,4 Nml/g STV
Caldas (2011)	Resíduos Sólidos	0 - 6,32	20,35 a 303, 22 mL CH ₄ /g STV

Fonte: Adaptado de Carvalho, 2013.

3.8. Aproveitamento do poder calorífico dos RSU aterrados.

Após passar pelo processo de decomposição biológica e conseqüentemente geração de biogás, o maciço de RSU de um aterro qualquer concentra componentes remanescentes cujo poder calorífico pode viabilizar a implementação de diversas tecnologias para aproveitamento energético dos mesmos.

Apesar de não ser o foco deste estudo, acredita-se ser interessante apresentar aqui algumas alternativas tecnológicas que tem motivado estudos recentes para aproveitamento da energia remanescente dos aterros.

De acordo com Carvalho (2013) atualmente os métodos mais utilizados para beneficiamento energético dos resíduos são: incineração controlada do RSU, gaseificação e plasma, onde independente do processo de beneficiamento, o objetivo básico destas tecnologias consiste na geração de combustíveis energéticos.

3.8.1. Incineração

A Incineração dos resíduos consiste na queima direta do material para produção de energia térmica. Durante esse processo podem ser formados diversos gases, tais como: CO₂, H₂O, O₂, N₂, e dependendo do material que está sendo incinerado, é possível gerar outros gases: CO, HCl, NO_x, SO₂, além da formação de compostos de metais pesados (HENRIQUES, 2004 *apud* CARVALHO, 2005).

Segundo Iawg (1997) a primeira instalação de incineração para RSU foi construída em Manchester – Inglaterra, em 1876. Esta unidade operou por cerca de 27 anos. Com o aumento considerável da geração de RSU após a 2ª Guerra Mundial, a incineração teve então a sua grande expansão, uma vez que permitia a destruição de grandes quantidades de resíduos.

O primeiro incinerador municipal no Brasil foi instalado em 1896 em Manaus. Com capacidade produtiva de 60 t/dia o equipamento manteve-se em operação até 1958, onde após inúmeros problemas de manutenção foi desativado (MENEZES, 2000).

Para Quina (2005) as instalações modernas de incineração contêm geralmente as seções indicadas na Figura 3-5: recepção e armazenamento dos RSU (1-2); sistema de alimentação da câmara de combustão (3-5); sistema de combustão (6-9); sistema de recuperação de calor para produção de energia elétrica (10, 12-13); recolha de escórias (11); sistema de controle de poluição atmosférica (14-17); e sistema de recolha das cinzas volantes e dos resíduos de controlo de poluição (RCP) produzidos no processo (18).

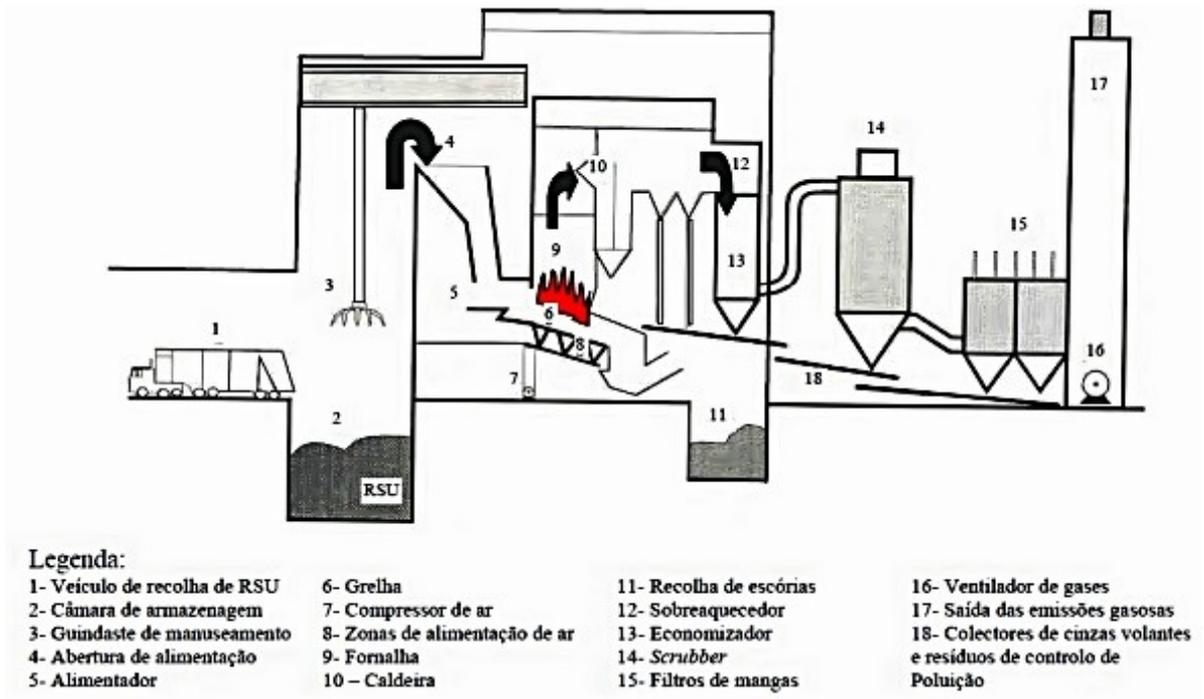


Figura 3-5 - Esquema genérico de uma instalação de incineração.

Fonte: IAWG (1997) *apud* Quina (2005).

Ainda segundo Quina (2005), durante o processo de combustão dos RSU são produzidos vários subprodutos, tais como escórias, cinzas volantes eliminadas na zona de recuperação de calor, as emissões gasosas e efluentes ou águas residuais, conforme apresentado na Figura 3-6.

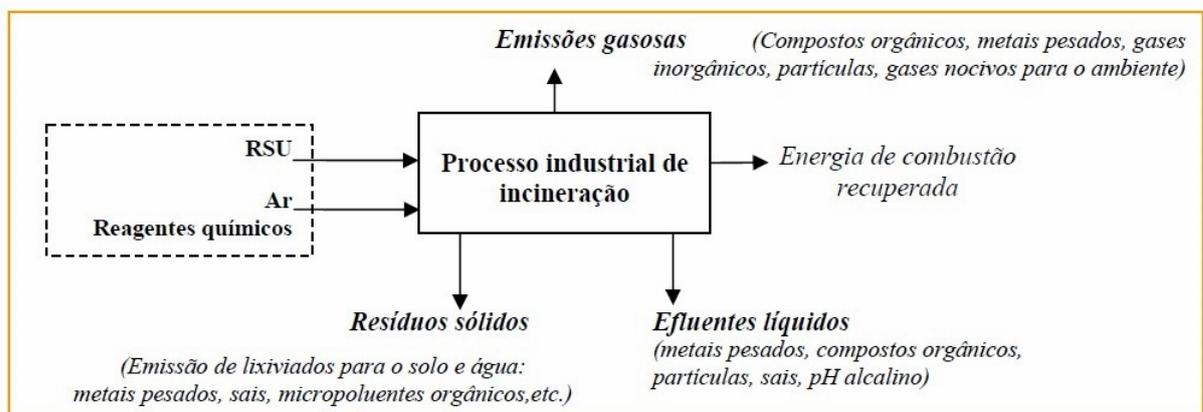


Figura 3-6 - Esquema genérico de uma instalação de incineração.

Fonte: IAWG (1997) *apud* Quina (2005).

Segundo Oliveira (2003) a energia é recuperada da corrente quente de gases por aquecedores convencionais, onde todo vapor produzido pode ser utilizado tanto para geração de energia quanto para aproveitamento de calor.

O processo de incineração apresenta vantagens e desvantagens, quando comparado com outras formas de tratamento de RSU, tais as apresentadas no Quadro 3-4, a seguir.

Quadro 3-4 – Vantagens e desvantagens da incineração de RSU.

Vantagens	Desvantagens
Redução dos resíduos em cerca de 70% em massa e 90% em volume (concentra a parte inorgânica);	Alguns materiais podem ser mais valorizados por via da reciclagem;
Valorização energética, o que pode tornar os custos de operação menores;	Podem produzir resíduos sólidos considerados perigosos;
Destruição dos agentes patogênicos e dos contaminantes orgânicos, não necessitando das lentas reações biológicas;	Se as condições operacionais não forem adequadas, pode gerar dioxinas, furanos e metais como As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg;
Controle das emissões gasosas garantindo os valores limites de emissão;	
Destruição em massa, sem necessidade de haver recolha seletiva ou pré-tratamento.	

Fonte: Autora.

3.8.2. Gaseificação

A gaseificação é o termo utilizado para um processo de conversão de combustíveis sólidos em gasosos, através de reações termoquímicas, envolvendo vapor quente e ar (ou O₂), em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico necessário para combustão).

Há vários tipos de gaseificadores, com grandes diferenças de temperatura e/ou pressão. Os mais comuns são os reatores de leito fixo e de leito fluidizado. O gás resultante é uma mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio, cujas proporções variam de acordo com as condições do processo (ANEEL,2002).

Morris (1999) especifica que geralmente o processo de gaseificação é baseado em um reator de leito fluidizado operando a pressão atmosférica e acoplado a um vaso onde todo gás produzido neste processo é resfriado e limpo em equipamentos convencionais. Segundo o autor, o gás produzido possui alto conteúdo energético, onde após a purificação ele pode atingir temperaturas mais elevadas sem comprometer os materiais envolvidos apresentando

assim eficiência de 30% de eletricidade.

Como todo processo industrial, a gaseificação pode apresentar vantagens e desvantagens, tais quais apresentadas no Quadro 3-5, a seguir.

Quadro 3-5 – Vantagens e desvantagens da gaseificação de RSU.

Vantagens	Desvantagens
Redução da quantidade volumétrica de RSU – até 90%;	Necessidades de intervenções periódicas – manutenção;
Redução da massa de RSU – até 75% do peso;	Possibilidade de falha no processo de recirculação do piche e dos gases voláteis para craqueamento.
Produz poucas cinzas – 8% a 12%;	
Menor quantidade de materiais necessários à limpeza dos gases;	
Alta eficiência térmica global – maior que a incineração.	

Fonte: Autora.

3.8.3. Arco de plasma

A tecnologia arco de plasma também conhecida como plasma pirólise consiste em um processo de decomposição química por calor na ausência de oxigênio. Esta é uma tecnologia dedicada à destruição dos resíduos que associa as altas temperaturas geradas pelo plasma com a pirólise dos resíduos.

O plasma é gerado quando as moléculas gasosas colidem com elétrons de alta energia carregados, resultando na geração de partículas carregadas concentradas em uma tocha que pode chegar a 9000 °C. A alta densidade de energia térmica do plasma no interior do conversor é transferida diretamente para os resíduos, que sofrem degradação instantânea e geram um gás combustível (BOSMANS *et al.* 2012 *apud* CARVALHO, 2013).

Num processo de queima de RSU o resíduo é termicamente decomposto em gás combustível numa fornalha vertical, onde o RSU é introduzido na fornalha por meio de um sistema de alimentação de câmaras estanques. Paralelamente o ar pré-aquecido, enriquecido ou não com oxigênio, é injetado na base da fornalha para alimentar a combustão de parte do material, sob a forma carbonizada neste ponto do equipamento. Desta forma os gases de queima são

conduzidos para um reator de decomposição térmica a plasma, onde são totalmente decompostos, tendo ao final como constituintes, basicamente, hidrogênio e monóxido de carbono (STRICKLAND, 2008).

A queima do resíduo é acompanhada da vitrificação do material inorgânico no fundo da fornalha. Na concepção deste processo nenhuma corrente resultante da queima pode deixar o sistema sem ser exposta a elevadas temperaturas, quer seja a escória vitrificada ou os gases da decomposição. A Figura 3-7 apresenta sistema de coleta de RSU através do arco de plasma da PyroGenesis (Empresa desenvolvedora de sistemas plasma).

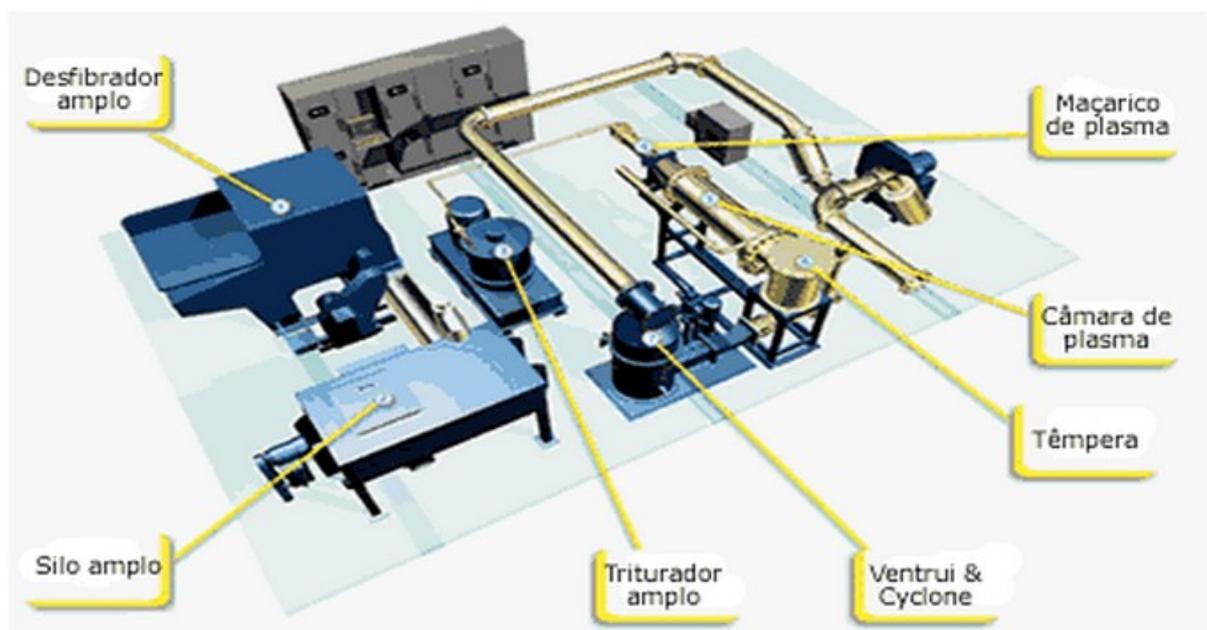


Figura 3-7 - Sistema de coleta de RSU através do arco de plasma da PyroGenesis.

Fonte: STRICKLAND, 2008.

A tecnologia de plasma possui uma grande vantagem em relação às outras de reaproveitamento devido à possibilidade de alimentação do sistema com todos os resíduos oriundos de aterros sanitários. Dessa forma, resíduo hospitalar, metais pesados e outros contaminantes podem virar pó e serem usados na fabricação de asfalto, não oferecendo mais riscos à saúde e meio ambiente.

3.9. Geração, tratamento e recirculação do chorume

Oliveira e Pasqual (2000), Segato e Silva (2000) e Lange e Amaral (2009), apontam que o processo de geração do chorume pode ser influenciado por vários fatores, tais como:

- Meteorológicos: precipitação pluviométrica, umidade, evapotranspiração, temperatura e ventos;
- Hidrogeológicos: escoamento superficial, infiltração subterrânea, topografia, geologia e recirculação do lixiviado;
- Características dos RSU: composição gravimétrica, permeabilidade, granulometria, peso específico etc.;
- Método de impermeabilização do local, quantidade de recicláveis e hábitos da população.

3.10. Características do chorume

Um dos principais motivos para a geração de chorume é o fato de que alguns componentes do RSU possuem água em excesso, em comparação com aquela necessária para a decomposição, e esta água extra acaba sendo liberada na forma de chorume. Além disso, o processo de compressão do RSU torna livre uma quantidade apreciável da água que chega ao aterro com os resíduos, o que, aliado às infiltrações decorrentes das precipitações locais ajuda na elevação do nível de chorume nas células (MATEUS, 1998). Os percolados gerados em aterros são líquidos escuros e turvos, de odor desagradável e que apresentam em sua composição altos teores de compostos orgânicos e inorgânicos, nas suas formas dissolvidas e coloidal (SILVA, 2002). Também denominados de chorume ou lixiviado, eles são gerados através do processo de degradação do resíduo e pela passagem de água de chuva, possuindo um alto potencial de contaminação (NASCIMENTO *et al.*, 2001).

Quando se deseja proceder a caracterização do chorume toma-se por base os mesmos parâmetros utilizados para controle da qualidade de águas superficiais, tais como: alcalinidade, dureza, pH, fosfato, nitrogênio, sólidos totais dissolvidos, oxigênio dissolvido,

demanda bioquímica de oxigênio, cloretos, sulfatos, metais tóxicos, etc. (BOSCOV, 2008).

O Quadro 3-6 traz parte de uma tabela apresentada por Pohland e Harper (1985) de alguns valores encontrados na literatura para caracterização do chorume, durante 4 das 5 fases de um aterro, sendo que é importante verificar a grande variabilidade desses valores.

Quadro 3-6 Caracterização do chorume

Parâmetros	Fases do aterro			
	Transição	Acidificação	Metanogênese	Final
DBO	100 – 10900	1000-57700	600-3400	4-120
DQO	480-18000	1500-71100	580-9760	31-900
COT	100-3000	500-27700	300-2230	70-260
AOV	100-3000	3000-18800	250-4000	0
DBO/DQO	0,23-0,87	0,4-0,8	0,17-0,64	0,02-0,13
TKN	180-860	14-1970	25-82	7-490
NH ₃ -N	120-125	2-1030	6-430	6-430
PO ₄ -P	0,6-1,7	0,2-120	0,7-14	0,2-14
Alc. Total	200-2500	140-9650	760-5050	200-3520
ST	2450-2050	4120-55300	2090-6410	1460-4640
pH	6,7	4,7-7,7	6,3-8,8	7,1-8,8
Cu	0,085-0,39	0,005-2,2	0,03-0,18	0,02-0,56
Fe	68-312	90-2200	115-336	4-20
Pb	0,001-0,004	0,01-1,44	0,01-1,0	0,01-0,1
Mg	66-96	3-1140	81-505	81-190
Mn	0,6	0,6-41	0,6	0,6
Ni	0,02-1,55	0,03-79	0,01-1,0	0,07
K	35-2300	35-2300	35-2300	35-2300
Na	20-7600			
Zn	0,06-21	0,65-220	0,4-0,6	0,4
Cd	190-490	70-3900	76-490	76-254
Cr	0,023-0,28	0,06-18	0,05	0,05

Fonte: Pohland e Harper (1985).

3.11. Tratamento para o chorume gerado em aterros sanitários.

Segundo Pereira (2000), várias são as dificuldades na escolha do melhor tratamento para chorume gerado em aterros sanitários. Esta decisão requer um estudo minucioso de viabilidade técnica e econômica. Em muitos casos o chorume é tratado como se fosse um efluente residual comum, ao qual são aplicadas metodologias de tratamento de águas residuais convencionais, ou então ele é ignorado nos projetos, seguindo para tratamento em conjunto com as águas residuais domésticas em estações de tratamento de efluentes municipais, sem qualquer consideração adicional, em relação à diferenciação entre esses dois efluentes

(RUSSO, 2000).

Hamada (2000) relata que as alternativas para tratamento do chorume incluem processos biológicos aeróbios e anaeróbios e métodos físicos e químicos, sem esquecer da possibilidade de recirculação do chorume no próprio aterro em que ele é gerado, como forma parcial de tratamento e posteriormente, a aspersão do chorume sobre o solo como forma de disposição final.

3.12. Recirculação do chorume em biorreatores.

Este item contempla dois estudos cujo foco principal é a aplicação da técnica de recirculação de chorume. Mesmo com métodos e resultados diferenciados, eles subsidiaram qualitativamente esta pesquisa.

O primeiro caso apresentado foi estudado por Sponza e Agdag (2004), cujos efeitos de recirculação de chorume e a taxa de recirculação necessária para o tratamento anaeróbio de resíduos sólidos urbanos foi investigada através de três biorreatores que simulavam as condições de aterros anaeróbios. Basicamente foram utilizados três reatores de estruturas similares: um reator de passagem única (que operou sem recirculação de lixiviados) e outros dois reatores (com recirculação de chorume – Reator 9 e Reator 21). A configuração esquemática dos reatores pode ser observada através da Figura 3-8, apresentada a seguir.

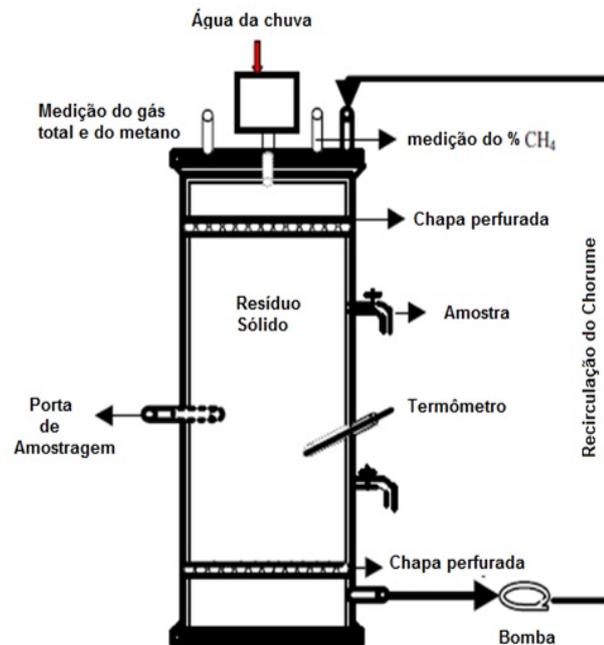


Figura 3-8 - Configuração esquemática do biorreator em escala laboratorial.

Fonte: Adaptado de Sponza D.T. and Agdag O.N., 2004.

Segundo o estudo, o Reator 9 operou com taxa de recirculação de chorume de 9 L/dia (13% do volume do reator), e o Reator 21, operou com taxa de recirculação de 21 L/dia (30% do volume de reator).

Em todos os três reatores foram monitorados o pH do lixiviado, demanda química de oxigênio (DQO), ácidos graxos voláteis (AGV), nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) e medições de metano.

Após 220 dias de incubação anaeróbia, observou-se que o pH, DQO, concentrações de AGV, produções de gás metano e percentual de metano no Reator 9 eram melhores do que no reator de passagem única e no Reator 21. As Figuras 3-9 a 3-12 apresentam os gráficos dos resultados alcançados durante o experimento.

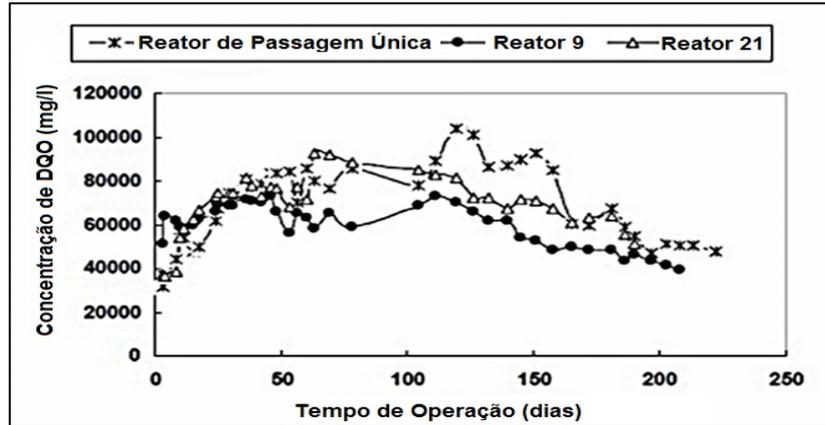


Figura 3-9 – Resultados alcançados – DQO.

Fonte: Adaptado de Sponza e Agdag, 2004.

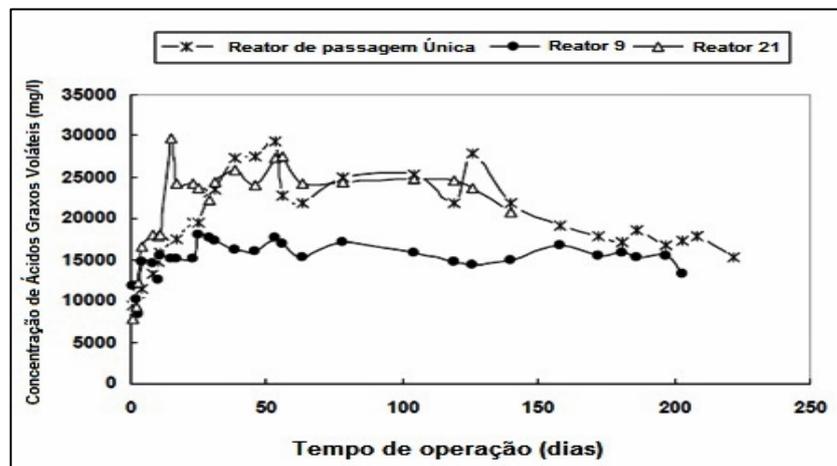


Figura 3-10 – Resultados alcançados – Ácidos Graxos Voláteis (AGV).

Fonte: Adaptado de Sponza e Agdag, 2004.

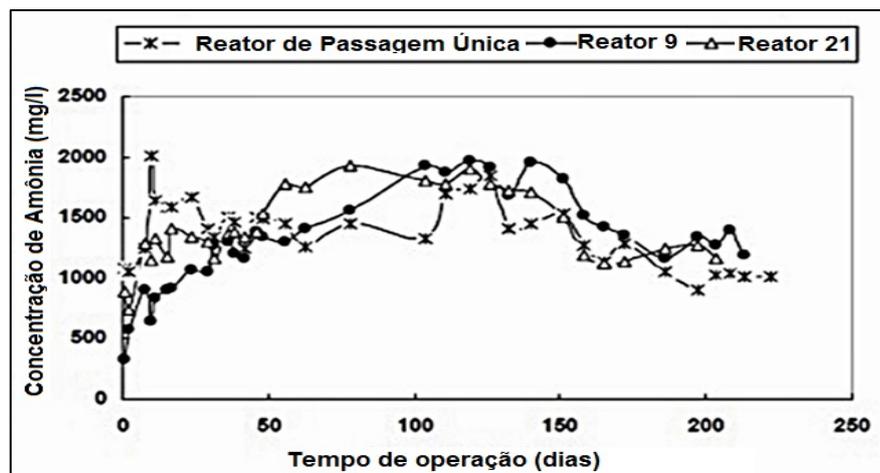


Figura 3-11 – Resultados alcançados – Amônia.

Fonte: Adaptado de Sponza e Agdag, 2004.

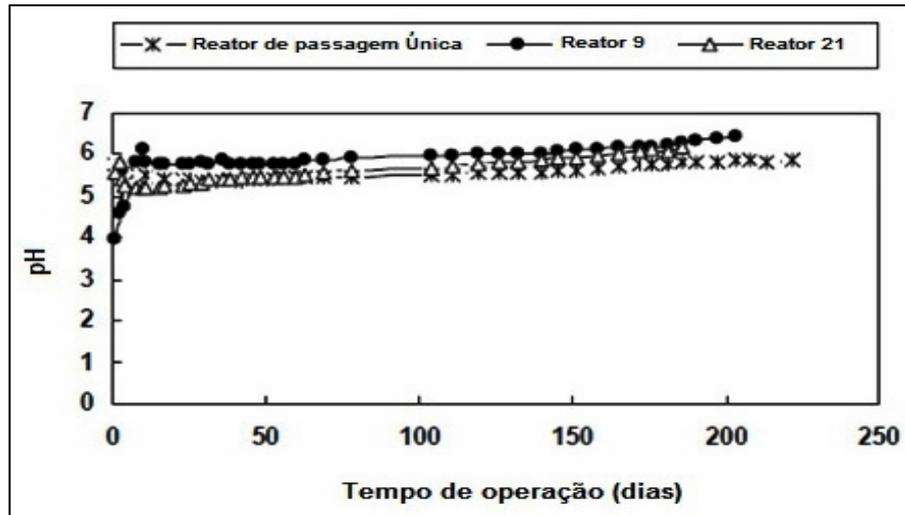


Figura 3-12 – Resultados alcançados - pH.

Fonte: Adaptado de Sponza e Agdag, 2004.

Com bases nos dados observados durante os 220 dias de experimento os autores concluíram que a recirculação de chorume contribuiu para a diminuição do tempo de estabilização dos resíduos, sendo eficaz no acréscimo e melhoria da produção de gás metano, todavia não foi expressiva para remoção de amônia do chorume. Constatou-se também que, nestas condições, a recirculação seria um método muito viável para o tratamento de lixiviados além de ser uma forma eficaz para melhorar a decomposição microbiana de RSU, além de acelerar a estabilização da matéria orgânica.

No segundo estudo selecionado, os autores Chan, Chu e Wong (2002) buscaram identificar o impacto da recirculação de chorume sobre a deposição conjunta de três resíduos principais: RSU, lamas e sedimentos marinhos de dragagens. Para tal, o estudo foi conduzido através de colunas de aço inox construídas em laboratório que simulavam as condições de um aterro sanitário. Foram acompanhados os parâmetros químicos (pH, DQO, amoniacal-N, P-total) e de produção de gás (volume total de gás, concentrações e as taxas de produção de CH_4 e CO_2), durante 11 semanas consecutivas.

Segundo o estudo, ao término do experimento as colunas com recirculação de chorume apresentaram aumento constante da taxa de produção de chorume chegando a 4,3 L/semana, enquanto que a taxa de produção de chorume nas colunas sem recirculação ficou com baixo nível (com pico máximo de 0,5 L/semana) conforme apresentado na Figura 3-13). A taxa de produção de gás em colunas com recirculação de lixiviados também aumentou de forma

constante nas primeiras nove semanas e depois começou a declinar, conforme pode ser observado na Figura 3-14 que apresenta a produção de gás (L) e as composições de metano e dióxido de carbono (%) recolhidas a partir de tratamentos com e sem recirculação de chorume.

Ainda com base na Figura 3-14 é possível constatar que os resultados a partir de Chan *et al.* (2002), comprovaram que a recirculação do chorume pode reduzir o período de transição para a produção do metano além de aumentar a fase da metanogênese de uma célula de aterro sanitário contendo RSU.

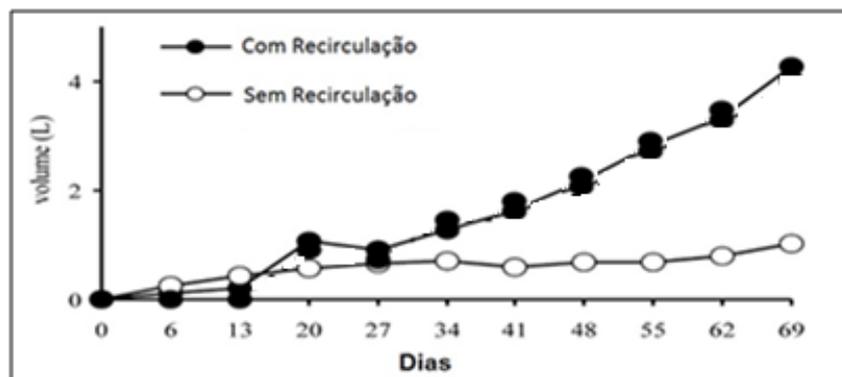


Figura 3-13 – Volumes de chorume produzidos e utilizados no experimento.

Fonte: Adaptado de Chan, Chu e Wong, 2002.

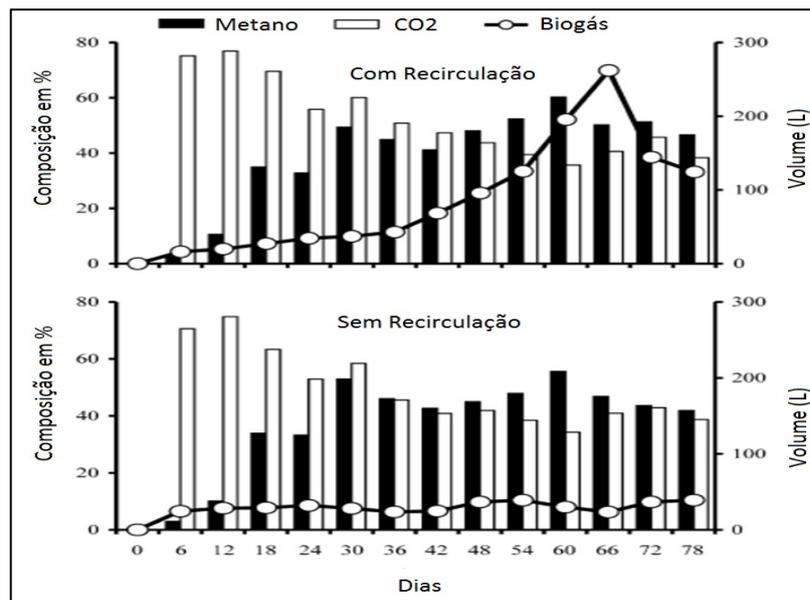


Figura 3-14 – Resultados da produção de gás.

Fonte: Adaptado de Chan, Chu e Wong, 2002.

Com relação aos resultados alcançados com o monitoramento dos parâmetros químicos, observa-se (Figura 3-15) que a maioria apresentou melhor desempenho na coluna com recirculação de chorume, uma vez que é notório a redução dos índices de DQO, pH, amoniacal-N. Ainda segundo os autores, o experimento comprovou que a recirculação de chorume reduz significativamente o tempo de estabilização dos resíduos e melhora a qualidade da produção de chorume e gás, especialmente em termos de carga orgânica.

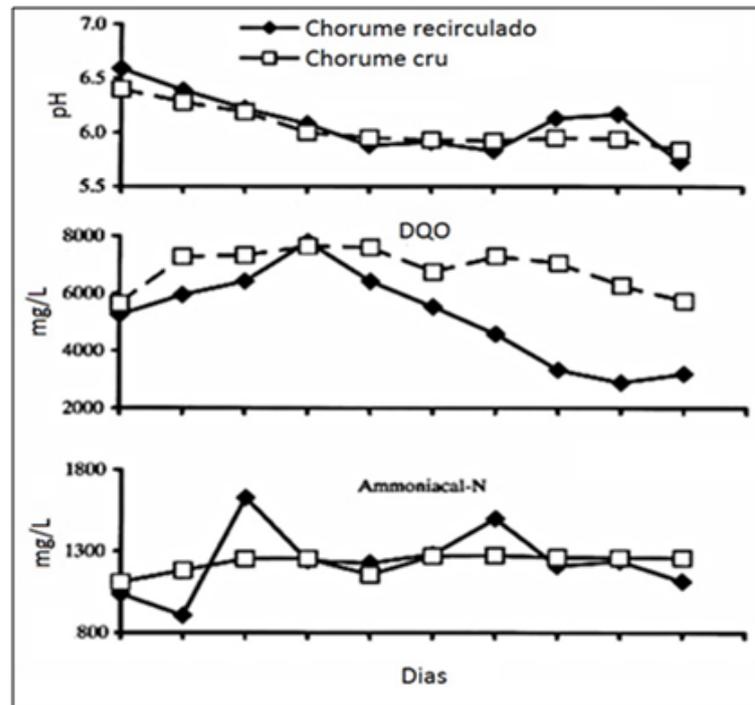


Figura 3-15 – Resultados das análises dos parâmetros químicos analisados.

Fonte: Adaptado de Chan, Chu e Wong, 2002.

Pohland e Gould (1984) *apud* Pinto (2000), observaram (em fase experimental) que a recirculação do chorume, pode provocar aumento do contato entre os sólidos, acelerar a estabilização e diminuir os níveis de concentração de metais pesados no maciço, desta forma a aplicação da técnica de recirculação de chorume entre uma célula de aterro e um digestor anaeróbio e/ou uma célula antiga de aterro podem contribuir significativamente para:

- Remoção de ácidos orgânicos nas células novas para tratamento posterior;
- O chorume que entra na célula nova terá alcalinidade suficiente para controlar o pH;
- O chorume que entra na célula nova proverá o inóculo para estabelecer uma população

microbiana rápida com o equilíbrio entre microorganismos acidogênicos e metanogênicos (CHYNOWETH *et al.*, 1991; CHYNOWETH *et al.*, 1998 *apud* O'KEEFE *and* CHYNOWETH, 2000);

- Presença de substâncias húmicas decorrente da degradação da celulose, onde esta seria a responsável pela formação de substâncias complexas que mobilizariam os íons metálicos.

3.13. Recirculação do chorume em aterros sanitários.

Na década de 60, Remson *et al.*(1969) *apud* Lima (1988), estudando o movimento de líquidos em aterros, sugeriram um método de recirculação de chorume através de sua incorporação na camada final de cobertura de aterro. Considerou-se, nesta mesma década, a construção de um protótipo para pesquisa do processo de decomposição anaeróbia, para tornar os estudos de campo compatíveis com os de laboratório. A este respeito, segundo Lima (1988), os estudos de laboratório foram conduzidos sem grandes dificuldades, porém os estudos de campo demandaram a aplicação de diversos equipamentos para controlar a migração de gases, os recalques e a percolação do chorume.

De acordo com Reinhart e Al-Yousfi (1996) os primeiros registros de recirculação de chorume em aterros ocorreram no fim da década de 70, em trincheiras horizontais, a fim de se promover uma aceleração dos processos aeróbios e anaeróbios dentro dos aterros.

Na década de 90, intensificaram-se as pesquisas sobre a recirculação de chorume, tanto no Brasil como no exterior, e desde então a recirculação do chorume tem sido apontada como excelente técnica para acelerar o processo de degradação dos resíduos sólidos em aterros (PINTO, 2000).

Segundo Baraldi (2003) as principais técnicas de recirculação do chorume aplicadas em aterros, ou seja, em escala real são:

- Pré-umidificação do resíduo: consiste na adição e mistura do chorume no RSU antes dele ser aterrado. Raramente utilizado em operações em grande escala.
- Pulverização: consiste aplicação direta do chorume no maciço através de sulcos

construídos com intuito de facilitar a taxa de infiltração, ou através de caminhões-tanque equipados com uma barra de pulverização que permite a aplicação do chorume. Embora econômico este método pode acarretar em odores desagradáveis e formação de névoas de chorume, além de contribuir para exposição do trabalhador a agentes insalubres.



Figura 3-16 – Pulverização do chorume via caminhão-tanque.

Fonte: Townsend *et al.*, (2008) *apud* Manzur (2010).

- Poços de injeção: A recirculação se dá através de poços rasos perfurados através do maciço de RSU, que podem possuir coberturas provisórias ou definitivas (Vide Figura 3-17). Geralmente possuem espaçamento e profundidade variáveis entre 10-30 metros e a taxa de injeção é limitada. Permite a remoção do biogás e controle de vetores e odores.



Figura 3-17 – Poços de injeção de chorume.

Fonte: Townsend *et al.*, (2008) *apud* Manzur (2010).

- Sistema de injeção: Podem ser utilizados sistemas verticais, horizontais ou associados. São instalados poços perfurados profundos em toda célula de RSU, cujo espaçamento varia de 20 - 500 m e profundidade pode variar entre 20-50 m. Intercalados aos poços profundos são instalados os poços rasos, que possuem melhor desempenho na captura do biogás. Estes sistemas são eficientes e permitem injetar grandes volumes de chorume no maciço, todavia necessitam de monitoramento sistemático em função da alta probabilidade de entupimentos das linhas de injeção e/ou na estabilidade do maciço (TCHOBANOGLIOUS *et al*, 1993). A Figura 3-18 apresenta croqui esquemático do sistema.

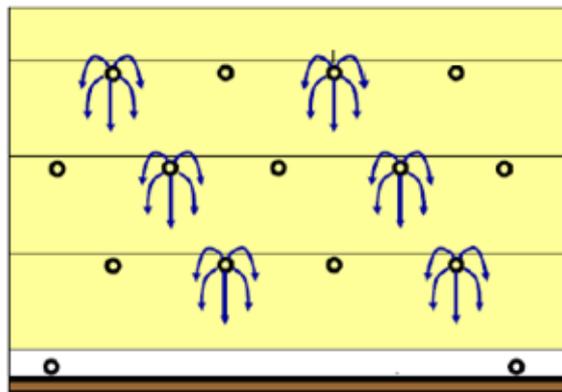


Figura 3-18 – Sistema de injeção de chorume.

Fonte: Adaptado de Townsend *et al.*, (2008) *apud* Manzur (2010).

De acordo com Manzur (2010) o método adequado para aplicação da técnica de recirculação, independente do local onde será aplicada, deverá ser estabelecido em função de vários fatores, tais como:

- Condição atual do aterro sanitário (novo, em operação ou hibernado);
- As fontes de chorume;
- Metas do proprietário (biogás, recalques ou redução de matéria orgânica);
- Recurso financeiro e equipamento disponível;
- Interferência com operações de aterros sanitários; e
- Atendimento a legislação vigente aplicável.

A ação de recircular o chorume contido no aterro se constitui numa oportunidade de auxiliar

no controle de umidade do sistema. Esta maneira de gerenciamento de chorume constitui-se numa estratégia de fornecer microrganismos, mistura e nutrientes, requeridos para uma rápida conversão dos resíduos sólidos urbanos e remoção de elementos inibitórios, durante a fase inicial do processo.

Pohland e Kim (1999) concluíram que a recirculação promove um melhor contato entre substratos insolúveis, nutrientes e microrganismos, e ao mesmo tempo trata o lixiviado acelerando a degradação anaeróbia dos resíduos, ou seja, a recirculação de lixiviado cria condições ideais de umidade e temperatura para digestão da fração orgânica dos RSU em ambiente de aterro sanitário (PICANÇO, 2004).

Para garantir a eficiência da técnica de recirculação de chorume deve ser avaliada a correlação entre a precipitação, o nível de chorume e as vazões de líquidos lixiviados, a fim de determinar o grau de complexidade da avaliação do balanço hídrico em aterros sanitário onde são dispostos resíduos sólidos urbanos, uma vez que estas variáveis podem comprometer não só o balanço hídrico do aterro, como também a estabilidade dos taludes.

As taxas de recirculação de chorume devem ser cuidadosamente controladas, pois caso haja um excesso, podem acontecer problemas estruturais de estabilidade dos taludes.

Pessin *et al* (2002) ao estudar o comportamento de células de aterramento de RSU da cidade de Caxias do Sul – RS (durante um período de 400 dias de experimento), utilizou uma taxa de recirculação de chorume desenvolvida através do estudo do balanço hídrico teórico da região de inserção do município de Caxias do Sul. Estipulada em função da média de precipitação local, a taxa de recirculação utilizada foi de 20% no período seco e 5% no período chuvoso.

Mehta *et al.* (2002) apresentou os resultados alcançados através de um programa de amostragem de RSU, realizado em grande escala, comparando-se duas células de aterro localizadas no Condado de Yolo. Os dados obtidos ilustraram que com a aplicação da técnica de recirculação de chorume houve uma melhoria na produção de metano oriundo dos processos de decomposição dos RSU. Ainda segundo os autores, quando se procede com a distribuição uniforme do chorume na célula de RSU, esta funciona como um grande biorreator, aumentando a possibilidade da total decomposição dos RSU.

Salienta-se que a aplicação da técnica de recirculação de chorume merece atenção especial da equipe de gerenciamento e monitoramento do aterro, uma vez que apresenta como potenciais

desvantagens:

❖ Implicações na qualidade do chorume

- Aumento do teor de sais e de amônia do chorume, que podem prejudicar os processos de tratamento utilizados;
- Aumento no chorume do teor de compostos orgânicos recalcitrantes aos processos de biodegradação;
- Necessidade de aplicação sobre áreas abertas do aterro, uma vez que não é aconselhada a aplicação sobre as partes impermeabilizadas;
- Elevação dos níveis de toxicidade, pois as bactérias metanogênicas são facilmente inibidas por toxinas, devido a sua pequena fração de substratos sintetizados em células e ao elevado tempo de geração dessas bactérias.

❖ Implicações na estabilidade do maciço

- Potencial aumento no nível de chorume e nos valores de pressão de gás no interior das células, podendo levar a instabilidades do maciço de RSU.

Para a aplicação da técnica de recirculação com segurança é necessário o monitoramento sistemático das variações das pressões de gás e do nível de chorume no interior das células, além do monitoramento cuidadoso das movimentações do maciço, de forma que qualquer tendência de instabilização seja detectada com a antecedência necessária para que medidas preventivas possam ser tomadas.

Quando monitorada de forma sistêmica e meticulosa a recirculação poderá acarretar em uma série de benefícios para a operabilidade e autossustentação do aterro. Reinhart e Al-Yousfi (1996) apresenta como vantagens da tecnologia de recirculação de chorume a rápida estabilização dos resíduos, melhor gerenciamento e tratamento do chorume, o incremento da produção de gás, a redução do volume dos resíduos e dos impactos ambientais em longo prazo.

Neste sentido, Gandolla (2000) também aponta para os benefícios da aceleração da metanogênese em aterros sanitários, através da utilização da atividade biológica existente nas partes mais antigas do aterro, para tratamento do chorume produzido nas partes mais recentes, através da inoculação com lodo de esgoto e a recirculação de chorume bruto ou biológico

tratado, com a adição de solução tampão e nutrientes.

Um dos parâmetros críticos no processo de recirculação do chorume é a determinação do volume de chorume a ser utilizado durante a aplicação da técnica. Além da quantidade do inóculo, deve ser também monitorado a quantidade de precipitado e as vazões de líquidos lixiviados, pois estes podem comprometer não só o balanço hídrico do aterro, como também a estabilidade dos taludes.

O monitoramento do nível de líquidos e das pressões de gás tem como objetivo acompanhar os níveis de pressões nos líquidos e/ou gases e identificar a possível formação de bolsões de líquidos no interior das células de resíduos do aterro sanitário. Esta verificação geralmente é realizada em poços piezométricos (Medidores de Nível de Líquidos) instalados em diversos pontos das células, poços de drenagem de gases definidos em projeto e em furos exploratórios executados nas células.

Deve ser avaliada então a correlação entre a precipitação, o nível e/ou vazões de líquidos lixiviados, a fim de determinar o grau de complexidade da avaliação do balanço hídrico em aterros sanitário onde são dispostos resíduos sólidos urbanos.

Alguns autores apontam que a análise dos dados, associada à observação do comportamento da rede de drenagem superficial em períodos chuvosos, sugere que as camadas de cobertura executadas têm-se mostrado eficientes, reduzindo a infiltração de águas pluviais. Do ponto de vista operacional, tal fato é extremamente importante, já que reduz a geração de líquidos lixiviados.

A experiência do monitoramento do aterro sanitário de Caxias do Sul (RS) foi relatada por Pessin *et al.* (1997), que observaram uma drástica redução do potencial poluidor dos líquidos percolados, após 400 dias de operação de um sistema de tratamento constituído de um filtro biológico anaeróbio, cujo efluente era recirculado para o interior das células.

Neste trabalho, segundo os autores, a técnica de recirculação foi de fundamental importância para a manutenção das condições ótimas de desenvolvimento de microrganismos anaeróbios no interior das células do aterro (pH, umidade e nutrientes), redução da carga orgânica e viabilização da etapa posterior de tratamento físico-químico.

Em outro trabalho, Pessin *et al* (2000) afirmaram que a célula monitorada, recebendo o

chorume tratado e recirculado, apresentou comportamento análogo ao de um filtro biológico operando em regime de carregamento contínuo. Entretanto, as taxas de recirculação de chorume devem ser cuidadosamente controladas, pois caso haja um excesso, podem acontecer problemas estruturais de estabilidade dos taludes.

Outra pesquisa interessante foi a apresentada por Monteiro *et al* (2000) cujo objetivo da pesquisa era uma análise comparativa dos recalques no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca, medidos de duas formas diferentes: em superfície (placas) e em profundidade (aranhas), a fim de se entender o comportamento da massa de RSU depositada envolvendo principalmente o processo de decomposição da matéria orgânica.

Na época foi adotada a técnica de recirculação do chorume, cujo processo foi iniciado pelas Células 1, 2, 3 e 4; as quais foram instrumentadas de forma a permitir os monitoramentos. A idade do RSU depositado nas Células 1 e 2 era de aproximadamente 15 anos e as Células 3 e 4 possuíam resíduos com idades variando de 1,5 a 2 anos.

Os resultados dos recalques alcançados ao longo da pesquisa encontram-se listados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 - Análise comparativa dos recalques superficiais.

Célula	Placa	Tempo de medição (anos)	Idade da célula (anos)	Recalque (mm)	Velocidade (µm/dia)
1	2-10	2	15	100-400	429
2	4, 6, 8, 9, 10	2	15	100-400	400
		3		500	
3	1 a 13	1	1,5	600-1.500	2625
4		1	2	400-1.300	2286

Fonte: Monteiro *et al* (2000).

De acordo com os autores, o estudo da deformação da massa de RSU servirá de referência para avaliar, juntamente com a análise de outros parâmetros geotécnicos, as condições de degradação/decomposição do RSU depositado no aterro, uma vez que os dados de recalque obtidos, demonstram o comportamento bem definido dos resíduos depositados nas Células 1, 2, 3 e 4, com relação a degradação da matéria orgânica (que correspondia a 60% em peso do RSU).

Posteriormente neste mesmo aterro Baraldi (2003) procedeu com uma pesquisa através de

diversos parâmetros físico-químicos a partir da análise em profundidade dos constituintes sólidos, líquidos e do biogás resultantes da digestão anaeróbia dos RSU com média de aterramento de 2 anos, que foram submetidos a técnica de recirculação de chorume. Segundo a autora a técnica mostrou-se bastante interessante para a aceleração da biodegradação dos sólidos, redução do potencial poluidor e contaminador do chorume, levando a constatação que a recirculação do chorume em resíduos jovens pode reduzir o tempo de decomposição, se tornando uma alternativa vantajosa na aceleração da bioestabilização em aterros sanitários.

4. O Aterro Sanitário Metropolitano Centro - ASMC

4.1. Histórico de operação e funcionamento

O Aterro Sanitário Metropolitano Centro (ASMC), fundado em 1997, é a maior unidade de disposição final de RSU do estado da Bahia (Figura 4-1). Localizado na Região Metropolitana de Salvador (RMS), a cerca de 10 km do Aeroporto Internacional de Salvador – Deputado Luís Eduardo Magalhães possui acesso facilitado e, desde 1997, recebe diariamente cerca de 2.200 toneladas de RSU provenientes de Salvador, Lauro de Freitas e Simões Filho.

Grande parte dos resíduos sólidos urbanos produzidos na cidade de Salvador é levada por caminhões compactadores para uma estação de transbordo localizada no bairro de Canabrava - área do antigo lixão da cidade. Da estação de transbordo o resíduo é transportado por carretas com capacidade para grandes volumes, direto para o ASMC. Nos locais mais próximos ao aterro, os resíduos são transportados diretamente em caminhões compactadores, o mesmo ocorrendo com os resíduos coletados em Simões Filho e Lauro de Freitas.

As atividades de disposição final de RSU no ASMC tiveram início em 1997, sendo a operação do aterro realizada pela Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia (CONDER). Em 1998, a CONDER transferiu essa atividade para a Prefeitura Municipal do Salvador (PMS), que, posteriormente, no início do ano 2000, passou a gestão para uma empresa privada, a Bahia Transferência e Tratamento de Resíduos S/A – BATTRE.

Através de um contrato de concessão, com prazo fixado em 20 anos, a BATTRE tornou-se responsável por todos os serviços realizados no empreendimento (implantação, operação, tratamento do lixiviado, tratamento do biogás e manutenção).

Assim, a BATTRE tornou-se responsável pela garantia da disposição final dos RSU com base nos critérios de engenharia civil/sanitária e em procedimentos técnicos operacionais que definem cuidados para controle da poluição ambiental e proteção à saúde pública (SOLVÍ, 2010).

A Figura 4-1 apresenta o registro fotográfico do ASMC.



Figura 4-1 – Vista aérea do ASMC.

Fonte: SOLVÍ (2010)

4.2. Unidade geradora de energia – Termoverde

No ASMC encontra-se instalada uma unidade termoelétrica geradora de energia através do biogás produzido durante o processo de decomposição dos RSU, denominada Termoverde.

A Termoverde é composta de uma usina geradora de energia com 19 motogeradores de 1.038 KW cada, unidade de tratamento do biogás, subestação elevadora e linha de transmissão de 7,8 quilômetros que liga a usina à rede elétrica da Coelba, que faz a distribuição às empresas consumidoras.

A potência instalada é de 19,73 MW e a produção é de 150 mil MWh ao ano – suficiente para atender 300 mil residências. As Figuras 4-2 a 4-4 apresentam o registro fotográfico da Termoverde.

Mensalmente são realizadas medições individuais do fluxo, temperatura e composição do biogás em todos os drenos do aterro. Os percentuais de metano e de dióxido de carbono presentes no biogás são algumas das variáveis críticas do processo, uma vez que elas são vitais para o bom funcionamento da Termoverde, e conseqüentemente para a maximização da geração de energia. Para que a Termoverde opere de forma contínua e produtiva é necessário que o percentual do metano no biogás esteja sempre superior a 42% e que a relação CH_4/CO_2 seja maior que 1,3.



Figura 4-2 – Vista Termoverde.

Fonte: SOLVÍ (2011)



Figura 4-3 – Motogeradores de 1038 KW.

Fonte: SOLVÍ (2011)



Figura 4-4 – área de compressores e filtros.

Fonte: SOLVÍ (2011)

4.3. Sistema de recuperação de biogás

O ASMC instalou um sistema de recuperação de biogás no final de 2003 como parte do mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Aterro. Este sistema é composto por:

- Drenos de Espinhas (DE), que são drenos horizontais feitos a partir da drenagem de chorume para obtenção do biogás;
- Drenos de Coberturas (DC), que foram construídos com objetivo de captar o gás entre a cobertura final de material e a manta de cobertura de PVC final;
- Drenos Perfurados (DP), que são drenos verticais construídos por uma sonda de perfuração no maciço do RSU para obtenção do biogás;
- Dreno de Superfície (DS), que tem como objetivo captar o gás entre a camada final do RSU e a cobertura de material;
- Dreno de Junção (DJ), que interliga duas ou mais células;
- Dreno de gás (DG), que são drenos verticais que nascem na base drenante do aterro até a cota final.
- Central de Captação do Biogás: Sala de controle operação onde ocorre o monitoramento quantitativo e qualitativo das correntes captadas pelos drenos conectados ao sistema. Através dela é possível identificar anormalidades operacionais e dar início a sistemática de recuperação das condições operacionais.

O sistema também conta com piezômetros que possibilitam a identificação de diversos parâmetros importantes, tais como nível do chorume, pressão e composição do biogás, etc. Sistemáticamente são realizadas análises da composição do biogás gerado em todo aterro, o que também possibilita um monitoramento específico na Macrocélula a fim de acompanhar as interferências decorrentes do sistema de recirculação de chorume, além de permitir que haja uma identificação das contribuições de geração de biogás por cada célula do aterro. Tal medição é efetuada através de analisador portátil que permite a determinação da fração de metano, dióxido de carbono e teor de oxigênio do gás de aterro.

A construção do sistema de drenagem profunda de gás seguiu o processo de disposição do

aterro, onde os drenos estão conectados em camadas mais profundas das células do aterro. Já os drenos superficiais estão localizados acima da camada final de RSU.

A Figura 4-5 apresenta o registro fotográfico de parte do sistema de drenos de gás instalado na macrocélula e a Figura 4-6 apresenta o registro fotográfico de um dos drenos.



Figura 4-5 – Sistema de recuperação de biogás

Fonte: A autora.



Figura 4-6 – Dreno Profundo

Fonte: A autora.

4.4. Estimativa de geração de metano no ASMC e na Macrocélula.

Caldas (2011) de posse dos resultados de L_0 e k dos RSU do ASMC, obtidos pelo procedimento proposto Machado *et al.* (2009), além do histórico mensal das quantidades de RSU dispostos mensalmente no ASMC, determinou a geração horária de CH_4 (Q) estimada para as células de disposição do aterro, para o período de operação da central de captação do biogás, a qual foi comparada com os valores de geração de CH_4 medida em campo.

No mesmo estudo também foram estimadas as curvas que delimitam os limites superiores e inferiores para um intervalo de confiança (I.C.) de 70% dos resultados. Tais limites são fundamentais para manter a operabilidade da Usina Termoverde.

Todos estes dados estão expressos na Figura 4-7 que apresenta a curva do comportamento da geração total de CH_4 no ASMC e na Figura 4-8 que apresenta a curva do comportamento da geração de CH_4 nas Células 1, 2, 3 e 4 do ASMC.

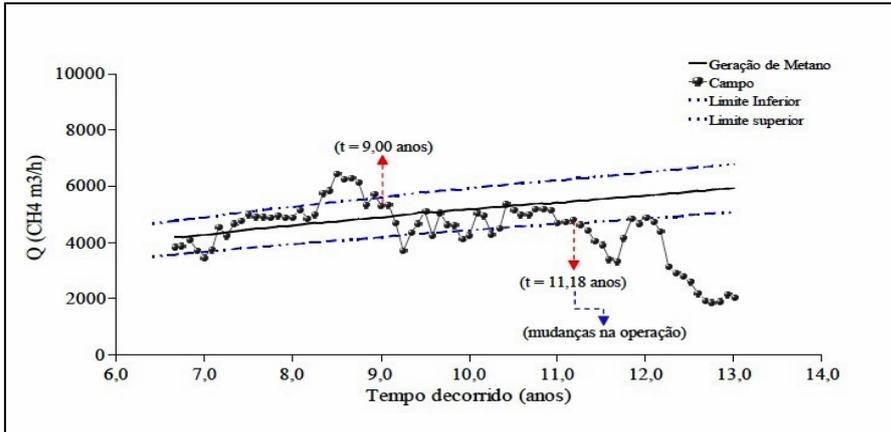


Figura 4-7 - Curva do comportamento da geração total de CH_4 no ASMC

Fonte: Caldas (2011).

Para o autor o decréscimo na geração de CH_4 em campo (a partir do tempo de disposição de 9 anos - outubro de 2006) tem relação com as mudanças na operação do aterro, tais como disposição de RN sobre RSU já aterrados há algum tempo, o que para Machado *et al.* (2009) altera o ambiente de decomposição estabelecido no interior do maciço, em que arqueas metanogênicas já estabelecidas sofreram com a influência das bactérias acidogênicas.

Ainda com base na Figura 4-7 a observa-se que geração de metano decaiu significativamente a partir do $t = 11,8$ anos, situando-se abaixo do limite inferior de controle, em decorrências de problemas operacionais que acarream em alterações nos procedimentos de operação e cobertura diária dos RSU, o que contribuiu para o aumento das emissões fugitivas de biogás para a atmosfera. Esse mesmo comportamento foi observado na Macro célula 1, conforme pode ser visto na Figura 4-8.

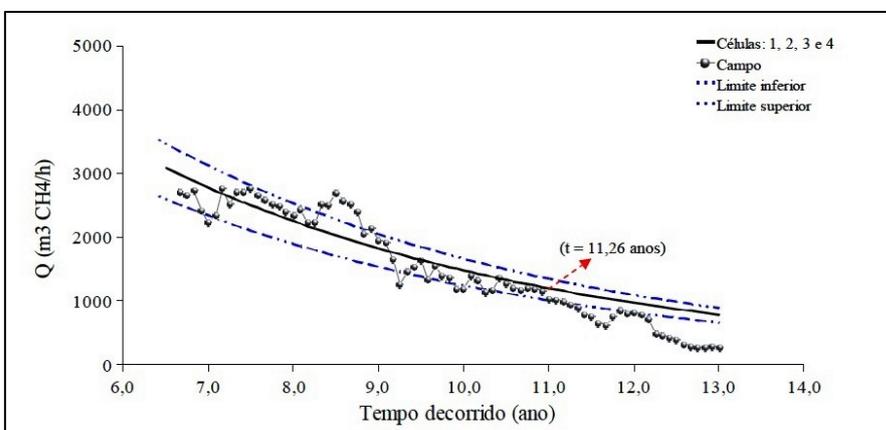


Figura 4-8 - Curva do comportamento da geração total de CH_4 na Macro célula.

Fonte: Caldas (2011).

4.5. Determinação do potencial bioquímico de metano do ASMC

Caldas (2011), utilizou-se do mesmo princípio de Hansen *et al.* (2004), na condução dos ensaios de determinação do potencial bioquímico do metano (BMP) para resíduos sólidos novos (RSN) e resíduos sólidos velhos (RSV). Foram utilizadas massas de 8 g para os RSN e 40 g para os RSV, cujo agente ativador (acelerador da decomposição) de cada amostra foi 200 ml do chorume oriundo das bacias coletoras do ASMC.

Segundo o autor, a quantidade de amostra de RSN utilizada nos ensaios de BMP foi determinada com base no potencial de geração de biogás teórico obtido por meio do procedimento proposto por Machado *et al.* (2009), no volume do digestor e na pressão admissível de 1400 mbar no digestor.

Com relação à quantidade de amostra utilizada nos ensaios de BMP para RSV, levou-se em consideração o potencial de geração de biogás teórico, o volume do digestor e uma pressão admissível de 1400 mbar no digestor, o que resultou em 20 g (T5 - 4,32 anos), 25 g (T6 - 6,15 anos e T7 - 6,26 anos) e 30 g (T4 - 6,32 anos).

Devido à carência de informações sobre as idades dos RSV, optou-se pela execução desses ensaios utilizando-se 40 g de material, o que poderia levar a um alívio de pressões dos digestores, caso a pressão interna dos digestores atingisse valores elevados, ou seja, acima de 1400 mbar (valor considerado para estanqueidade dos digestores e para pressão interna admissível por cada digestor).

Todos os ensaios foram em triplicata, excetuando-se as amostras de RSN e de RSV com 6,26 anos de aterramento, que tiveram cada uma a realização de seis ensaios. Após 60 dias de incubação e monitoramento o volume de gás gerado foi medido por um transdutor de pressão de 600 kPa e a composição foi medida com o aparelho de análise de gases GEM 2000. Os resultados apresentaram um potencial de produção de CH₄ (L₀) conforme pode ser observado na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 Resultados da geração e da composição química relativa do biogás, L_0 e dos valores ajustados de k para as amostras de RSU ensaiadas nos testes de BMP.

RSU (Idade)	Biogás (m ³ /Mg-RSU)	Composição do biogás (%)		L_0 (m ³ CH ₄ /Mg - RSU)	k ano ⁻¹
		CO ₂	CH ₄		
RSN (0,0)	151,70	55,00	45,00	68,27	25,55
	146,28	42,00	58,00	84,84	29,20
	157,76	42,00	58,00	91,50	32,85
	156,38	42,00	58,00	90,70	32,85
T2 (2,0)	16,16	38,00	62,00	10,02	18,25
	18,79	39,00	61,00	11,46	21,90
T3 (4,23)	14,33	38,00	62,00	8,89	18,25
	8,26	39,00	61,00	5,04	29,20
	11,17	38,00	62,00	6,93	21,90
T5 (4,32)	33,69	46,00	54,00	18,19	29,20
	30,22	47,00	53,00	16,02	25,55
	49,06	43,00	57,00	27,97	18,25
T6 (6,15)	42,63	41,00	59,00	25,15	32,85
	41,32	40,00	60,00	24,79	36,50
T7 (6,26)	5,74	46,00	54,00	3,10	10,95
	4,56	45,00	55,00	2,51	47,45
	8,44	46,00	54,00	4,56	10,95
	7,93	79,00	21,00	1,67	21,90
	10,52	68,00	32,00	3,37	18,25
	8,71	77,00	23,00	2,00	21,90
T4 (6,32)	29,50	41,00	59,00	17,41	21,90
	21,27	42,00	58,00	12,34	21,90

Fonte: Adaptado de CALDAS (2011)

4.6. Sistema de drenagem do chorume

No ASMC o sistema de drenagem do chorume é composto por camadas de material granular de alta permeabilidade (brita), camadas de solo protegidas por uma membrana geotêxtil, tubulações perfuradas de polietileno de alta densidade (PEAD) e reservatórios e/ou bacias de contenção.

Todo chorume oriundo do processo de decomposição do RSU é encaminhado para as bacias de contenção de chorume (Figuras 4-9 e 4-10) via tubulações, de onde é bombeado para o pátio de carregamento de chorume (Figura 4-11) e posteriormente enviado para tratamento externo na Central de Tratamento de Resíduos e Efluentes Líquidos (CETREL), empresa localizada no Polo Industrial de Camaçari responsável pelo tratamento e disposição final dos efluentes e resíduos industriais, bem como pelo monitoramento ambiental do Polo e de toda a sua área de influência. Diariamente (exceto aos domingos) são realizadas análises nas amostras de chorume coletadas na bacia de contenção. Estas análises são realizadas por um dos laboratórios da CETREL.



Figura 4-9 – Registro fotográfico das bacias gêmeas de contenção de chorume
Fonte: A autora.



Figura 4-10 – Registro fotográfico da bacia envelopada de contenção de chorume
Fonte: A autora.



Figura 4-11 – Registro fotográfico do pátio de carga de chorume

Fonte: A autora.

4.7. Caracterização do RSU disposto no ASMC

Desde 2003 o ASMC conta com uma parceria com o Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA (GEOAMB), que é responsável pela caracterização sistemática (semestral) dos RSU do ASMC.

O processo de caracterização é dividido em duas fases, conforme apresentado na Figura 4-12. A primeira fase visa a obtenção da massa de RSU, determinação da composição gravimétrica e do teor de umidade. Já a segunda etapa é focada na determinação do teor de sólidos totais voláteis e teor de lignina.

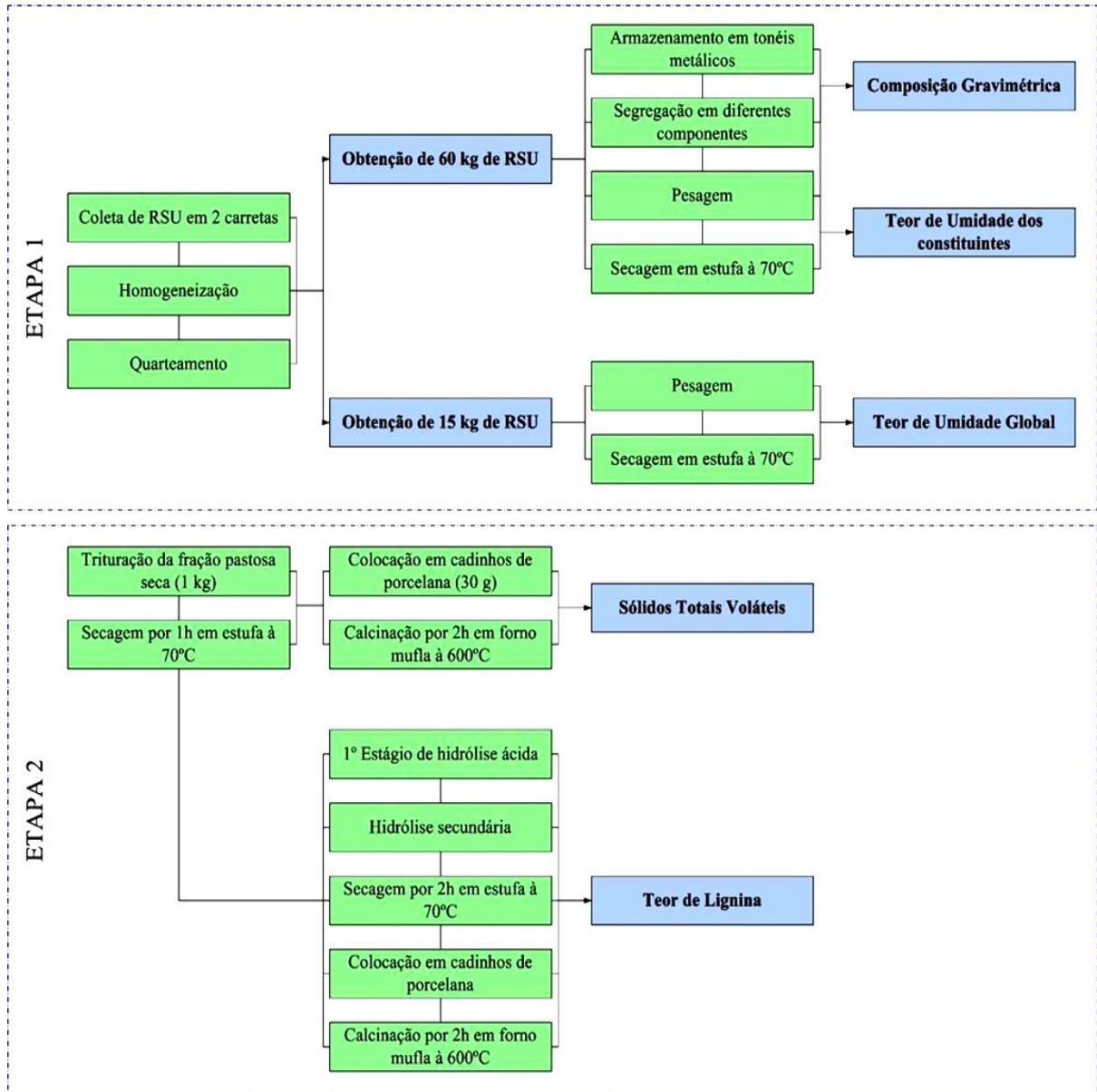


Figura 4-12 – Atividades de Caracterização do RSU no ASMC.

Fonte: CALDAS (2011).

Durante o procedimento de coleta os resíduos são dispostos sobre uma manta plástica, procedendo-se com a homogeneização e quarteamento do material, até a obtenção de duas amostras representativas: uma utilizada para caracterização dos RSU e outra utilizada para determinação do teor de umidade global dos RSU.

A Figura 4-13 apresenta uma sequência de fotos que ilustram o processo de caracterização. As fotos 1 e 2 retratam a coleta do material; as fotos 3 e 4 retratam a homogeneização do material; a foto 5 registra a separação manual dos componentes e a foto 6 apresenta a

pesagem dos constituintes.



Figura 4-13 – Processo de caracterização dos RSN no ASMC.

Fonte: CALDAS (2011)

A Tabela 4-2 apresenta a composição gravimétrica dos RSN (Resíduos Sólidos Novos) coletados em diferentes épocas, em termos de base seca (BS) e base úmida (BW).

Tabela 4-2 - composição gravimétrica dos RSN coletados em diferentes épocas, em termos de base seca (BS) e base úmida (BW)

Amostragem	Componentes - Porcentagem de Ocorrência (%)									
	Madeira	Pedra/cerâmica	Têxtil	Borracha	Plástico	Vidro	Metal	Papel/papelão	Fração Pastosa	
jan/04	BS	1,51	6,01	4,28	0,04	25,51	3,6	3,58	19,78	35,68
	BW	1,09	3,38	4,72	0,03	21,4	1,83	2,1	19,08	46,38
set/04	BS	1,89	14,41	2,25	0,42	24,22	2,93	2,35	15,12	36,41
	BW	1,82	9,43	2,51	0,26	22,08	1,63	1,43	20,3	40,53
mar/05	BS	7,75	6,03	4,03	0,76	27,17	1,15	2,84	22,23	28,04
	BW	5,99	3,61	4,83	0,47	26,14	0,63	1,88	21,69	34,77
set/05	BS	4,68	16,39	1,59	1,17	23,16	4,75	1,85	8,42	37,99
	BW	1,5	9,8	2,34	0,66	20,79	2,64	0,4	12,92	48,95
mar/06	BS	4,22	9,62	0,95	0,03	16,47	5,23	1,36	19,77	42,31
	BW	3,32	5,29	0,93	0,02	14,32	2,58	0,89	21,91	50,75

Tabela 4-2 - composição gravimétrica dos RSN coletados em diferentes épocas, em termos de base seca (BS) e base úmida (BW)

Amostragem		Componentes - Porcentagem de Ocorrência (%)								
		Madeira	Pedra/cerâmica	Têxtil	Borracha	Plástico	Vidro	Metal	Papel/papelão	Fração Pastosa
out/06	BS	2,91	18,1	5,44	0,15	26,45	1,93	1	7,62	36,39
	BW	3,85	12,55	9,46	0,11	17,09	1,21	0,83	10,68	44,23
mar/07	BS	4,6	4,45	5	0,07	17,09	4,42	4,2	19,73	40,45
	BW	3,15	2,26	4,74	0,04	16,62	2,01	2,36	21,44	47,3
set/07	BS	6,05	5,33	6,8	0,56	16	5,05	4,8	21,75	33,66
	BW	5,65	2,56	6,05	0,33	23,59	2,12	2,52	23,99	33,19
mar/08	BS	9,04	5,92	3,12	0,08	20,45	5,03	3,07	21,2	32,27
	BW	9,47	3,08	2,33	0,04	14,59	2,39	1,72	23,55	42,82
out/08	BS	8,85	5,15	1,82	0,23	11,85	1,96	1,07	19,19	49,87
	BW	6,17	2,77	2,76	0,22	13,83	0,96	0,58	17,32	55,39
mar/09	BS	10,34	19,98	3,91	0,61	18,62	2,49	1,85	14,52	27,68
	BW	11,87	11,64	4,48	0,4	16,28	1,41	1,19	19,21	33,52
set/09	BS	5,01	7,19	5,7	1,43	20,33	4,54	3,26	21,87	30,67
	BW	8,42	4,19	5,1	0,87	18,2	0,35	2,03	24,31	36,53
mar/10	BS	7,57	7,56	4,67	2,34	25,19	1,66	1,83	20,26	28,92
	BW	6,71	3,8	4,94	1,37	20,16	1,78	0,93	24,48	35,83

Fonte: GEOAMB - UFBA

A Tabela 4-3 apresenta composição física gravimétrica média, em base seca, dos RSN dispostos no ASMC. Os dados apresentados na tabela foram estabelecidos com base na caracterização de oito amostras, coletadas de 2003 à 2007, período selecionado para desenvolvimento desta pesquisa em função da atividade da Macrocélula.

Destaca-se que os componentes dos RSU foram classificados em 9 categorias: madeira, papel/papelão, têxtil, plástico, borracha, vidro, pedra/cerâmica, metal e fração pastosa (materiais orgânicos facilmente degradáveis tais como frutas, verduras, restos de alimentos; moderadamente degradáveis (folhas) e todos demais não podem ser identificados ou não são possíveis de serem inseridos em outras categorias).

A quantificação da porcentagem de matéria orgânica biodegradável presente na fração pastosa dos resíduos foi obtida através da determinação dos sólidos totais voláteis (STV), ou seja, a matéria orgânica foi obtida multiplicando-se o percentual de ocorrência da fração pastosa na

amostra pelo seu STV.

Tabela 4-3 - Composição física dos resíduos dispostos no ASMC.

Componentes	Porcentagem de ocorrência (%)		
	RSU novo	RSU com 1 ano de aterramento	RSU com 4 anos de aterramento
Madeira	4,7	8,1	12,6
Pedra / cerâmica	12,3	16,4	5,8
Têxteis	2,9	2,0	3,3
Borracha	0,3	0,3	1,0
Plástico	21,8	8,7	34,3
Vidro	3,8	5,2	3,6
Metal	3,0	9,0	2,6
Papel / papelão	15,5	4,2	5,5
Fração pastosa	35,4	46,0	31,5
Sólidos totais voláteis STV (%)	54,8	28,7	23,2
Matéria orgânica presente na fração pastosa (%)	19,4	13,3	7,3

Fonte: GEOAMB - UFBA

Ainda com base nos dados apresentados na Tabela 4-3 é possível perceber que há uma redução da quantidade de matéria orgânica presente no RSU, que possivelmente seria proveniente da fração pastosa ao longo do tempo de aterramento.

A Tabela 4-4 apresenta comparativo da caracterização dos RSN do ASMC (Tabela 4-3) com os apresentados por Baraldi (2003), cujas amostras foram retiradas de uma célula do Aterro Sanitário de Muribeca em Pernambuco. Amostragem C5 corresponde a caracterização realizada na célula C5 cuja disposição ocorreu durante os anos de 1993 a 2002. A Amostra C2 corresponde a caracterização realizada na célula C2 também do aterro de Muribeca cuja disposição ocorreu no mesmo período da C5.

Ressalva-se que a composição dos RSU aterrados no ASMC e em Muribeca é variável em virtude de fatores como: poder aquisitivo da população, hábitos de consumo, período do ano, serviço de limpeza urbana, dentre outros.

Tabela 4-4 – Comparativo da composição gravimétrica ASMC e Aterro Muribeca.

Componentes	Porcentagem de ocorrência (%)			
	RSU com 1 ano de aterramento - ASMC	RSU com 4 anos de aterramento - ASMC	C2 (1993 a 2002) - Muribeca (BARALDI,2003)	C5 (1993 a 2002) - Muribeca (FARIAS, 2000)
Plástico	8,70	34,30	17,48	2,56
Vidro	5,20	3,60	1,62	0,49
Metal	9,00	2,60	3,51	0,71
Fração pastosa	46,00	31,50	47,02	47,92
Outros	31,00	28,20	30,37	30,30

Fonte: A autora.

Complementando a análise da composição gravimétrica, foram também analisados o teor de umidade (base seca e base úmida), teor médio de sólidos totais voláteis, matéria orgânica e lignina obtidos para a fração pastosa dos RSU estudados no ASMC.

As Tabelas 4-5 a 4-7 apresentam os resultados correspondentes as amostragem dos RSN, durante os anos de 2004 a 2007.

Tabela 4-5 - Teor de umidade médio, em base seca de cada componente do RSN coletado em diferentes datas.

Teor de umidade – Base seca (%)									
Amostras	Madeira	Pedra/ Cerâmica	Têxteis	Borracha	Plástico	Vidro	Metal	Papel/ papelaço	Fração pastosa
Média (2004 a 2007)	72,88	13,69	122,62	24,60	71,91	1,65	22,76	131,62	135,77
Des.Padrão	33,39	3,58	25,79	19,70	28,85	1,51	10,22	32,59	23,29
Coef. Var.	0,39	0,33	0,37	0,82	0,38	1,00	0,34	0,25	0,19

Fonte: GEOAMB - UFBA/ BATTRE.

Tabela 4-6 - Teor de umidade global para os resíduos novos estudados.

Amostras	Umidade Global (%) – Base seca		Umidade Global (%) – Base úmida	
	Amostras de RSU sem separação dos componentes	Via secagem individual de cada componente	Amostras de RSU sem separação dos componentes	Via secagem individual de cada componente
Média (2004 a 2007)	98,28	97,62	48,99	48,81
Desvio Padrão	22,45	19,98	5,82	4,79

Fonte: GEOAMB - UFBA/ BATTRE.

Tabela 4-7 – Teor médio de sólidos totais voláteis, matéria orgânica e lignina obtidos para a fração pastosa dos resíduos estudados.

Resíduos	% Fração Pastosa	STV (%)	MO da fração Pastosa (BS)	Lignina (%)
Média dos RSN	36,37	54,97	19,89	19,10
1 ano	46,20	28,70	13,30	-
4 anos	31,53	23,20	7,25	10,50

Fonte: GEOAMB - UFBA/ BATTRE.

Além da caracterização física dos RSN o ASMC procedeu com a caracterização dos Resíduos Sólidos Velhos (RSV), ou seja, dos RSU já aterrados na macrocélula. Um dos objetivos era comparar o material encontrado com os que chagavam diariamente no aterro. Desta forma, foram realizadas escavações na macrocélula, conforme apresentado na Figura 4-14, utilizando-se de cotas diferenciadas para a coleta, a fim de se caracterizar os RSU correspondente aos anos de 2003, 2007 e 2010.

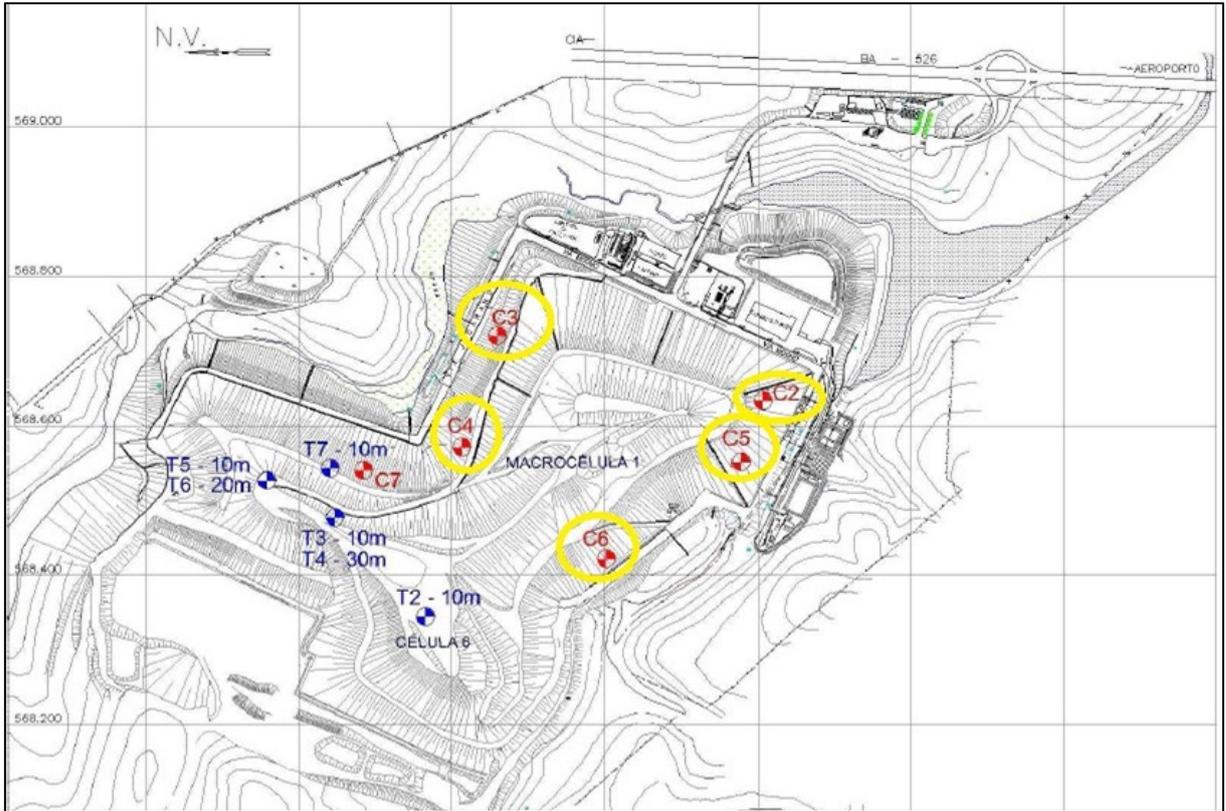


Figura 4-14 – Localização dos pontos de amostragens dos RSV no ASMC – Destaque para pontos na macrocélula (círculo amarelo).

Fonte: Adaptado de CALDAS (2011)

Após a coleta, os RSU foram dispostos sobre manta plástica, procedendo-se com a homogeneização e quarteamento do material, até a obtenção das amostras representativas.

A Figura 4-15 apresenta algumas etapas da caracterização dos RSV, em diferentes tempos de aterramento no ASMC executada durante o ano de 2008 por Caldas (2011). As fotos 1 a 6 retratam seqüência de atividades de escavação e coleta do RSV.



Figura 4-15 – Processo de caracterização dos RSV no ASMC.

Fonte: CALDAS (2011)

A Tabela 4-8 apresenta os resultados do teor de umidade em base seca, por componente dos RSV.

Tabela 4-8 - Teor de umidade em base seca, por componente dos RSU aterrados, coletados por meio de abertura de cavas.

Identificação		Teor de umidade (%) - Base seca			
Cava/ Tradagem	Tempo de aterramento (anos)	Madeira	Papel/ papelão	Inertes	Fração Pastosa
C1	4,00	--	--	--	--
C2	8,76	--	--	17,03	71,68
C3	7,84	111,68	149,75	51,64	63,12
C4	5,50	119,74	126,26	60,62	84,42
C5	9,09	121,11	149,17	49,67	70,87
C6	4,42	97,70	135,07	50,52	63,56

Fonte: GEOAMB - UFBA/ BATTRE.

A Tabela 4-9 apresenta os resultados do teor de umidade global em base seca dos RSV. Os resultados apontam valores de umidade global para os RSV inferiores aos encontrados para os RSN, confirmando a tendência de perda de água dos resíduos após seu aterramento.

Tabela 4-9 - Teor de umidade global para resíduos sólidos velhos (RSV) obtidos por meio de abertura de cavas.

Cava	Teor de umidade global (%) - Base seca			Umidade global do RSU em base Úmida (%)	
	Identificação	Tempo de atterramento (anos)	Médias de 3 amostras específicas		Via secagem individual de cada componente
^{a,c} C1		4,00	90,18	-	-
^c C2		8,76	69,46	^b 39,21	40,97
^c C3		7,84	70,12	65,98	41,22
^c C4		5,50	70,27	77,39	41,27
^c C5		9,09	63,70	68,84	38,91
^c C6		4,42	57,06	63,92	36,33

^a Obtida por meio da abertura manual de cava em 2003;

^b A grande diferença encontrada sugere provável perda de água dos componentes após a coleta;

^c Machado *et al.* (2008)

Fonte: Adaptado de CALDAS (2011)

5. Materiais e métodos

5.1. Área de estudo – Macrocélula de disposição de resíduos

Por concepção de projeto, as células de disposição de resíduos que compõe a Macrocélula 1 eram distintas, ou seja, inicialmente foram projetadas quatro células C1, C2, C3 e C4 conforme apresentado na Figura 5-1. Entretanto com o início da operação de disposição dos RSU foram realizadas manobras operacionais que culminaram na junção destas quatro células originando a Macrocélula 1, conforme pode ser observado na Figura 5-2.

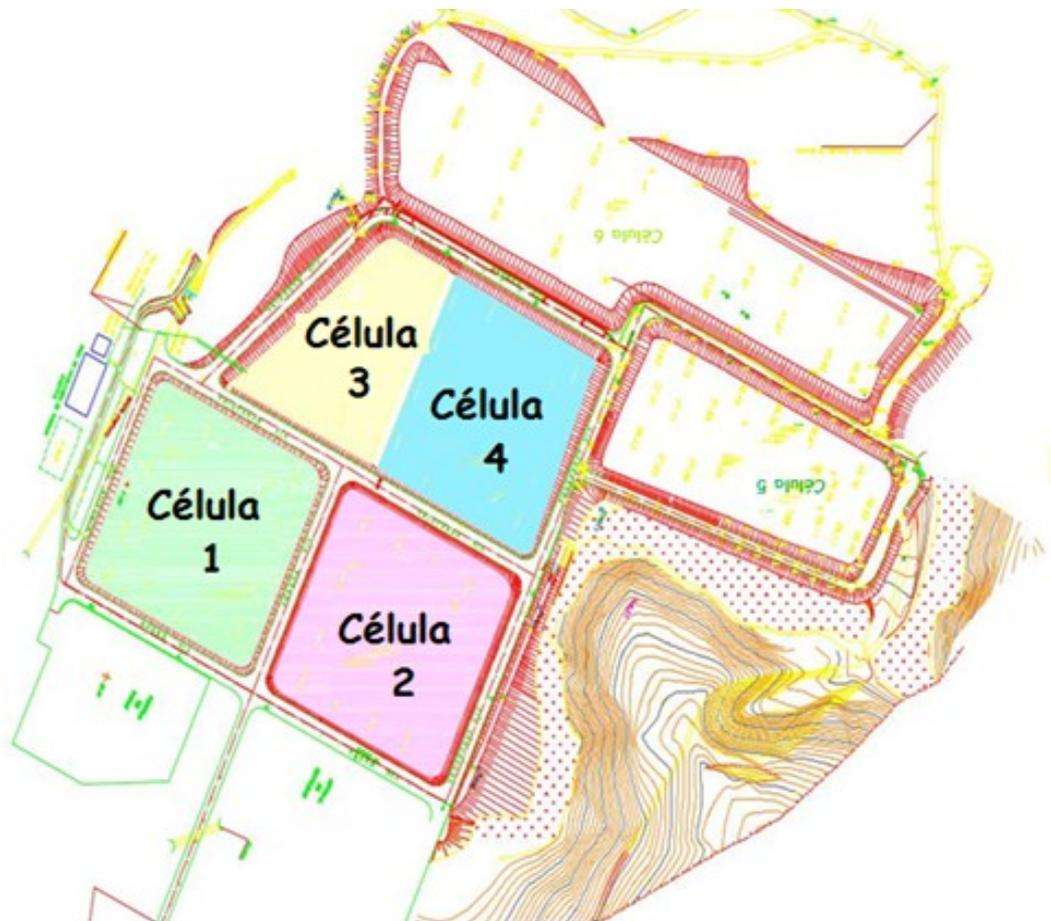


Figura 5-1 – Croqui esquemático células de disposição - ASMC.

Fonte: A autora.



Figura 5-2 – Registro fotográfico macrocélula 1 – destaque para áreas de disposição do resíduo sólido recente e resíduo sólido antigo.

Fonte: A autora.

Durante o período compreendido entre outubro de 1997 a abril de 2010 a macrocélula recebeu cerca de 4.658.145,86 m³ de RSU, distribuídos em suas 4 células, conforme detalhamento apresentado no Quadro 5-1. Para fins didáticos, de acordo com o período de aterramento, os RSU dispostos na macrocélula foram classificados como resíduo sólido velho (RSV) e resíduos sólido novo (RSN), cuja a disposição destes encontra-se destacada na Figura 5-2.

Quadro 5-1- Disposição de RSU na macrocélula – ASMC.

	C1	C2	Junção C1/C2	C3/C4	Retorno macrocélula	
	Resíduo Sólido Antigo				Resíduo Sólido Recente	C3 e C4
Operação	Outubro de 1997 a dezembro de 1999	Setembro de 1999 a agosto de 2000	Maior a agosto de 2000	Agosto de 2000 a abril de 2003	Setembro de 2004 a maio de 2005	Setembro de 2009 a abril de 2010
Resíduos aterrados (m³)	745.273,71	514.364,53	224.033,43	2.301.485,03	322.306,80	550.412,36

Fonte: A autora.

Todos os resíduos dispostos na macrocélula 1, passaram por um processo de operação que envolvia atividades de espalhamento, compactação e recobrimento.

As etapas compreendidas neste processo eram:

1. Chegada do RSU ao aterro (por meio de caminhões);
2. Pesagem dos RSU;
3. Disposição dos RSU na célula em operação;
4. Espalhamento dos RSU através de tratores de esteira;
5. Compactação;
6. Recobrimento;
7. Controle topográfico.

Ao ser atingida a capacidade máxima de recebimento de RSU, eram encerradas as operações. Procedia-se então com:

1. Compactação de uma camada de solo com 1 (um) metro de espessura sobre os resíduos;
2. Instalação dos Drenos de Cobertura – DC, de forma horizontal a fim de promover a captação da emissão de gases que atravessam a camada de cobertura de solo e conduzi-los para a central de gás.
3. Instalação da manta conjugada de PVC com geotêxtil com espessura nominal de 1 mm;
4. E por fim, aplicação de uma camada de solo vegetal (com espessura de aproximadamente 1 m) para o plantio de gramíneas.

5.2. Sistema de drenos de gás.

Na macrocélula foram instalados 37 drenos para acompanhamento sistemático, sendo 06 drenos de gás (DG), 01 dreno de junção (DJ), 27 drenos espinhas (DE) e 03 drenos profundos (DP). Estes drenos foram instalados no intuito de se estudar a influência da injeção do chorume no comportamento da macrocélula, conforme pode ser observado na Figura 5-3.

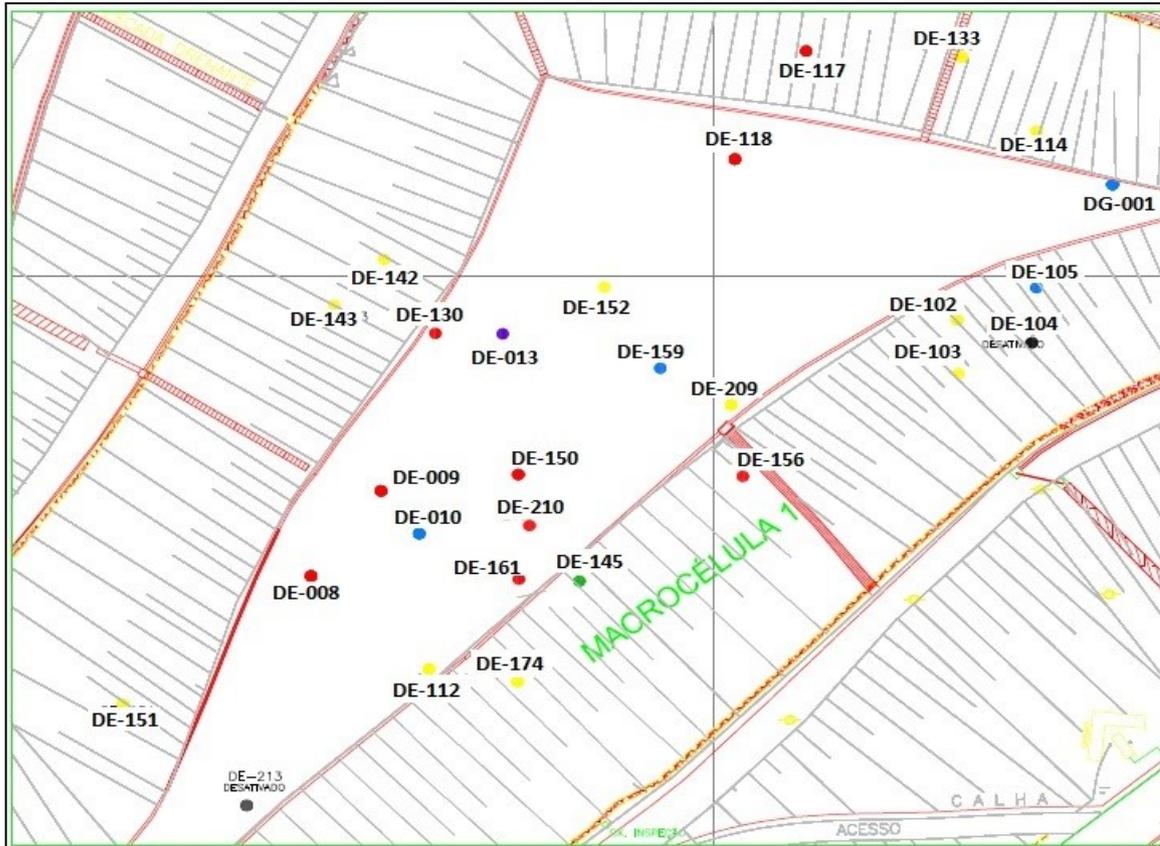


Figura 5-4 – Produção de biogás DE-102.

Fonte: A autora.

5.3. Monitoramento qualitativo do chorume.

A fim de caracterizar o chorume gerado nas células de disposição de RSU, bem como analisar a qualidade do efluente enviado para tratamento externo na CETREL, o ASMC procede com coletas periódicas em diversos pontos localizados em todo aterro, além da análise do chorume enviado via carretas.

Na Macro célula 1 estão localizados quatro destes pontos, em que:

- Mensalmente são realizadas análises de pH, condutividade e temperatura;
- Trimestralmente são realizadas varreduras completas: físico-química, cromatográfica, microbiológica e ótica.

Outro ponto que subsidia esta pesquisa é a qualidade do chorume que é recirculado, desta forma, também se acompanhou a caracterização do chorume armazenado na bacia de contenção, seguindo a mesma periodicidade dos demais pontos localizados na Macro célula 1.

Após o início da recirculação de chorume, foram realizadas coletas eventuais em dois pontos pré-definidos visando a identificação qualitativa do chorume recirculado após ele permear pela Macro célula e antes dele chegar à bacia de contenção. Na Figura 5-5 é possível identificar os pontos de coleta de chorume relacionados com a pesquisa.

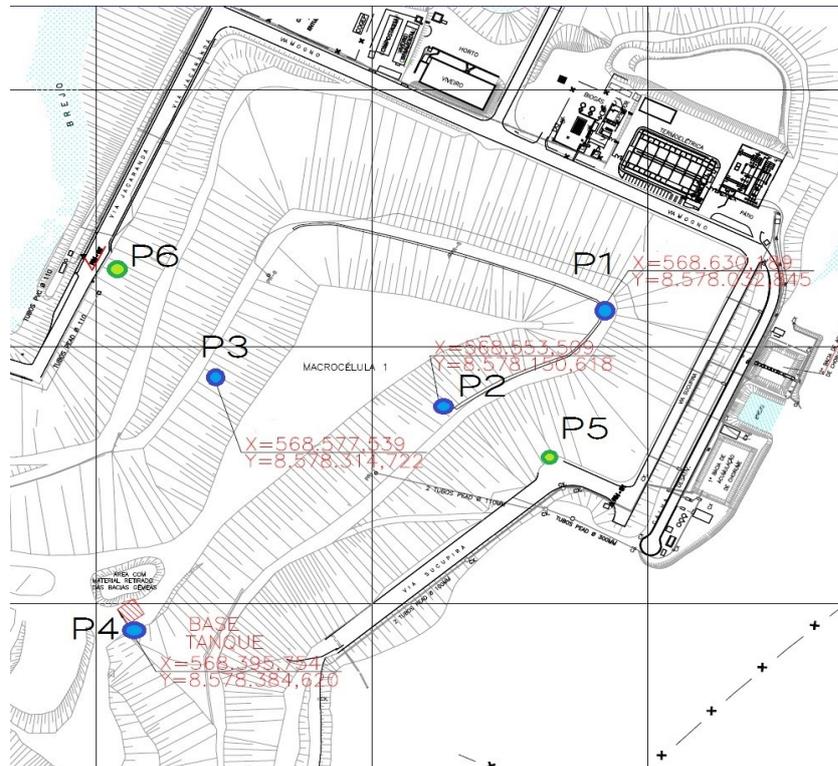


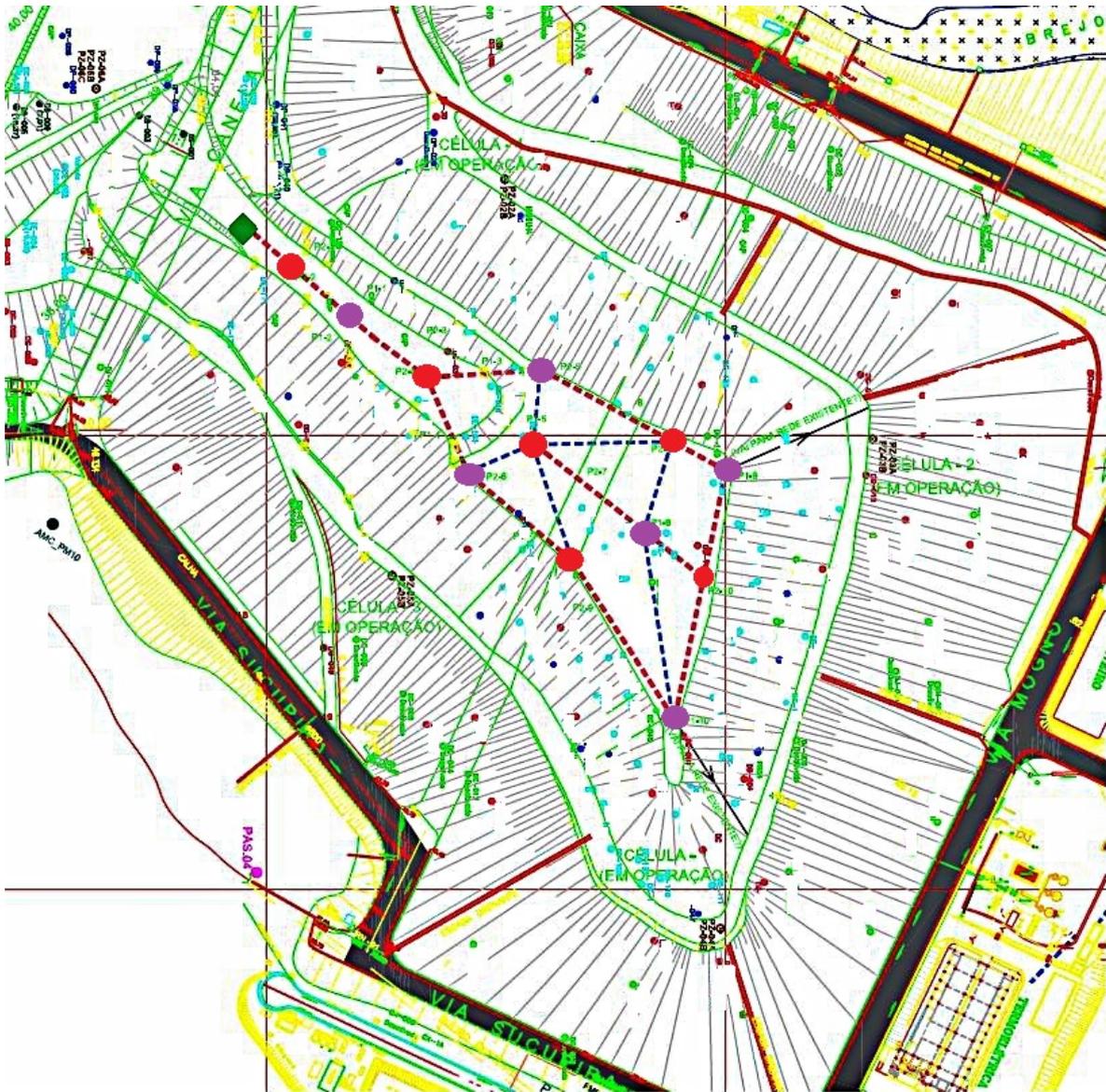
Figura 5-5 – Localização dos pontos de coleta de chorume relacionados com a pesquisa – destaque círculos azul claro.

5.4. Sistema de recirculação do chorume.

O sistema de recirculação de chorume, objeto deste trabalho, é composto por 11 DP e 1 DG, além das tubulações em PEAD. Destes 12 drenos, 6 são do tipo P1 (Figura 5-7), ou seja, funcionam como poço de coleta de gás e injeção de chorume, possuindo 25m de profundidade; e os outros 6, do tipo P2 (Figura 5-8), que funcionam apenas para a coleta de gás e possuem 12m de profundidade.

Estas diferenças nas profundidades dos drenos foram pensadas no intuito de proporcionar uma melhor homogeneidade no sistema de injeção entre as células (C1, C2, C3 e C4) e entre camadas de resíduos velhos e recentes.

A Figura 5-6 apresenta croqui do sistema de recirculação do chorume, projeto pela empresa Cepolina S/C Ltda.



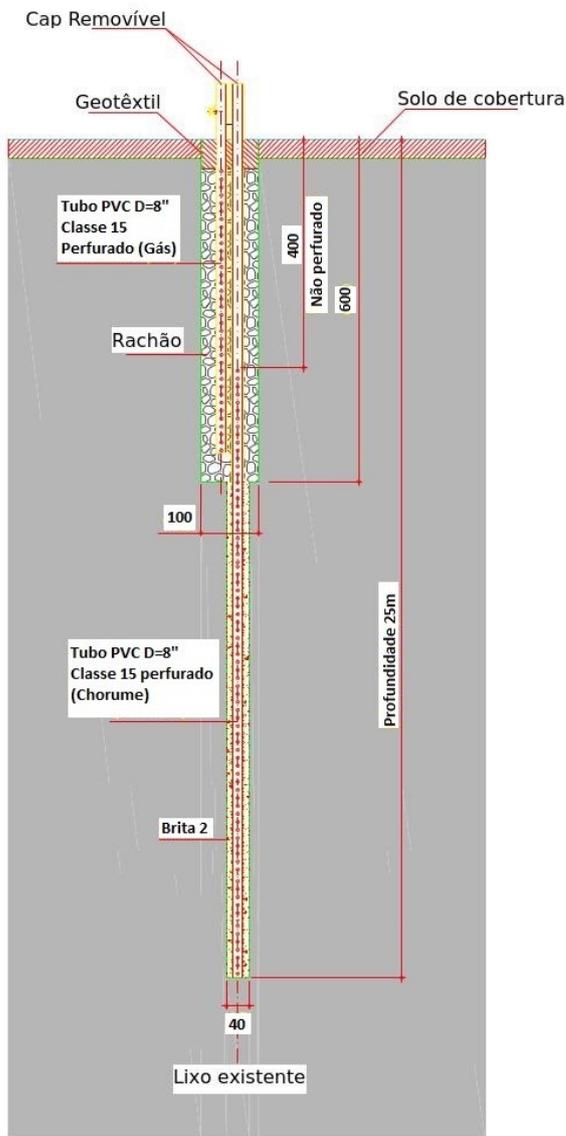
Legenda:

- | | | | |
|-------------|---|---|----|
| — · — · — · | Dreno Longitudinal tipo P-1 | ● | DG |
| - - - - - | Dreno transversal tipo P-2 | ● | DE |
| ● | Poço de alívio de gás e injeção de chorume tipo P-1 | ● | DP |
| ● | Poço de alívio de gás tipo P-2 | ● | DC |
| ◆ | Tanque de recirculação do chorume | | |

Figura 5-6 – Croqui esquemático sistema de recirculação de chorume.

Fonte: A autora.

POÇOS DE GÁS E INJEÇÃO DE CHORUME - TIPO - P1



DRENOS LONGITUDINAIS TIPO P1

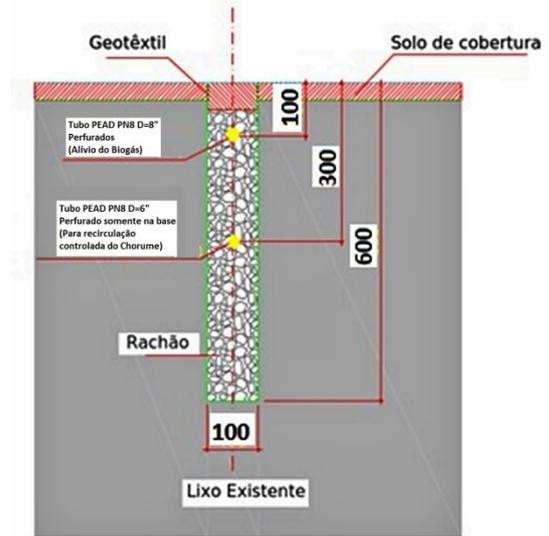


Figura 5-7 - Croqui esquemático Poços e Drenos tipo P1.

Fonte: A autora.

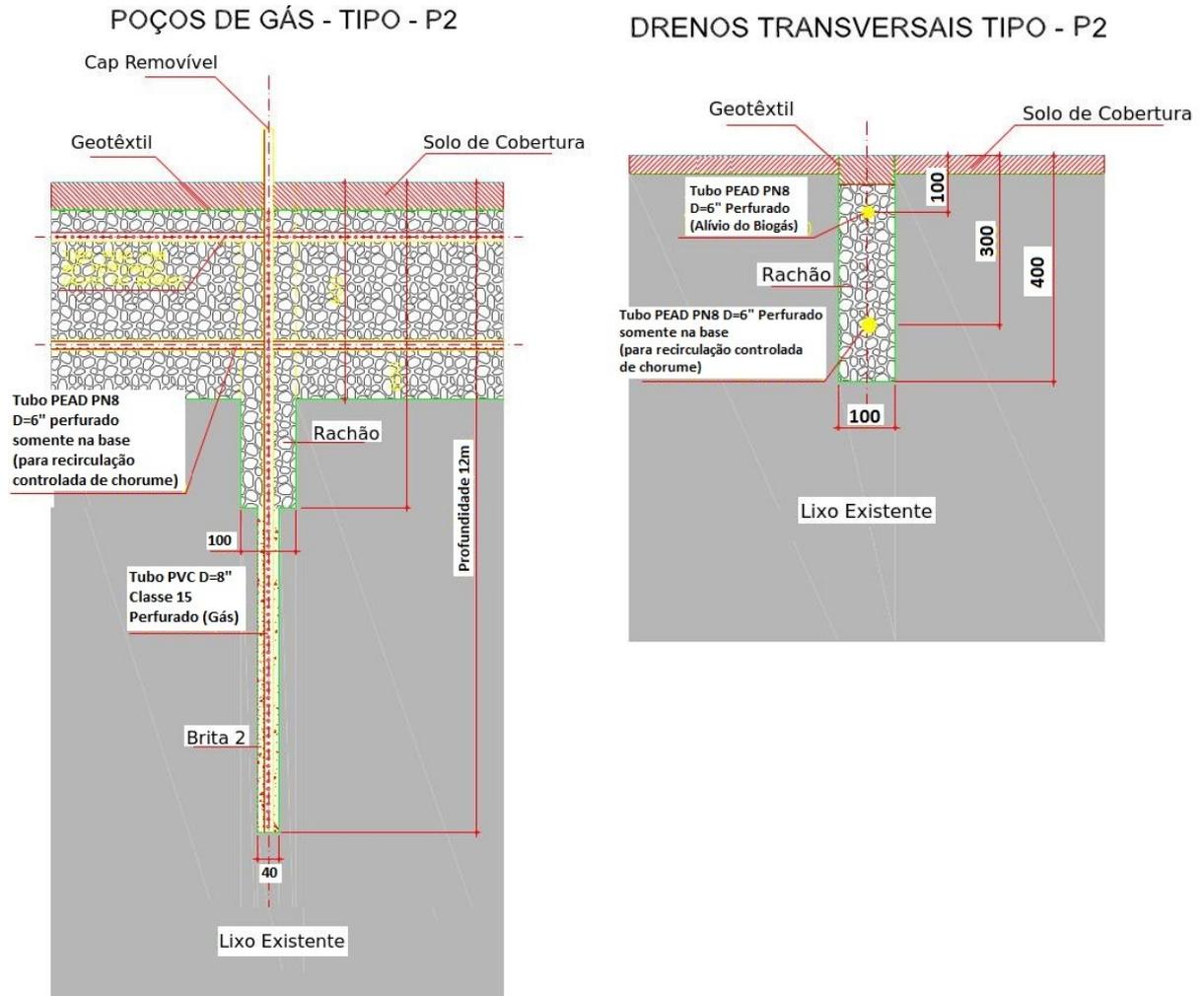


Figura 5-8 – Croqui esquemático Drenos P2.

Fonte: A autora.

O processo de recirculação inicia-se com o bombeamento do chorume das bacias gêmeas de armazenamento para o tanque de chorume (Figura 5-9).

Do tanque, através da força gravitacional, o chorume é direcionado para os drenos, seguindo um procedimento básico, desenvolvido no intuito de minimizar os efeitos da perda de carga e proporcionar uma distribuição mais uniforme do chorume no maciço.

Na saída do tanque de chorume há um ramal de distribuição com válvulas de retenção que permitem a regulação da direção e vazão a ser utilizada na recirculação. É neste ponto que é definida a rota de injeção.



Figura 5-9 – Tanque de recirculação de chorume.

Fonte: A autora.

Na fase inicial do processo a sistemática de recirculação adotada foi:

1. Bloqueio da tubulação situada a esquerda e ao centro da válvula, de forma que o chorume seja injetado apenas na tubulação situada a direita desta válvula;
2. Após a injeção do volume desejado, inverte-se a chave bloqueando a tubulação a direita e liberando a tubulação a esquerda;
3. Após o esgotamento do volume desejado, procede-se com o desbloqueio da chave e injeta-se o chorume por ambos os lados da tubulação.

Em função da carência de informações a respeito da taxa de injeção de chorume ideal, bem como informações referentes ao comportamento do maciço optou-se em iniciar a recirculação com uma taxa diária de 10 m³/dia.

A medida que a recirculação avançava, era acompanhado o comportamento do maciço e aumentando gradativamente a taxa de recirculação, conforme apresentado no Quadro 5-2. As elevações das taxas eram em função das respostas obtidas com base nas variáveis: pressão, recalque e deslocamento horizontal.

Quadro 5-2 - Evolução dos volumes de injeção de chorume na macrocélula no ASMC.

Data	Volume de injeção
04/07/2012	10 m ³ / dia
19/07/2012	15 m ³ / dia
01/08/2012	30 m ³ / dia
08/10/2012	40 m ³ / dia
18/01/2013	50 m ³ / dia
04/02/2013	80 m ³ / dia
15/04/2013	100 m ³ / dia
27/09/2013	120 m ³ /dia

Fonte: A autora.

Numa segunda fase, quando o volume de injeção já era superior a 80 m³/dia, a sistemática de injeção foi alterada em função do tempo hábil necessário para completar a operação. Nesta fase, a injeção passou a ocorrer em ambos os lados da válvula simultaneamente, havendo apenas o controle manual da vazão injetada por meio de ajuste manual da válvula de retenção (Figura 5-10).



Figura 5-10 – Válvula de retenção e controle da taxa de injeção de chorume.

Fonte: A autora.

5.5. Monitoramento geotécnico.

O ASMC conta com um programa de monitoramento geotécnico, realizado em parceria com a equipe do GEOAMB - UFBA, correspondente às movimentações dos marcos superficiais e valores registrados nos piezômetros instalados nas células de resíduos sólidos. Mensalmente são monitorados cerca de 45 marcos superficiais (MS) e 14 piezômetros (PZ) instalados em todo aterro, onde destes, 20 marcos e 07 piezômetros estão instalados na macrocélula, conforme pode ser observado na Figura 5-11.

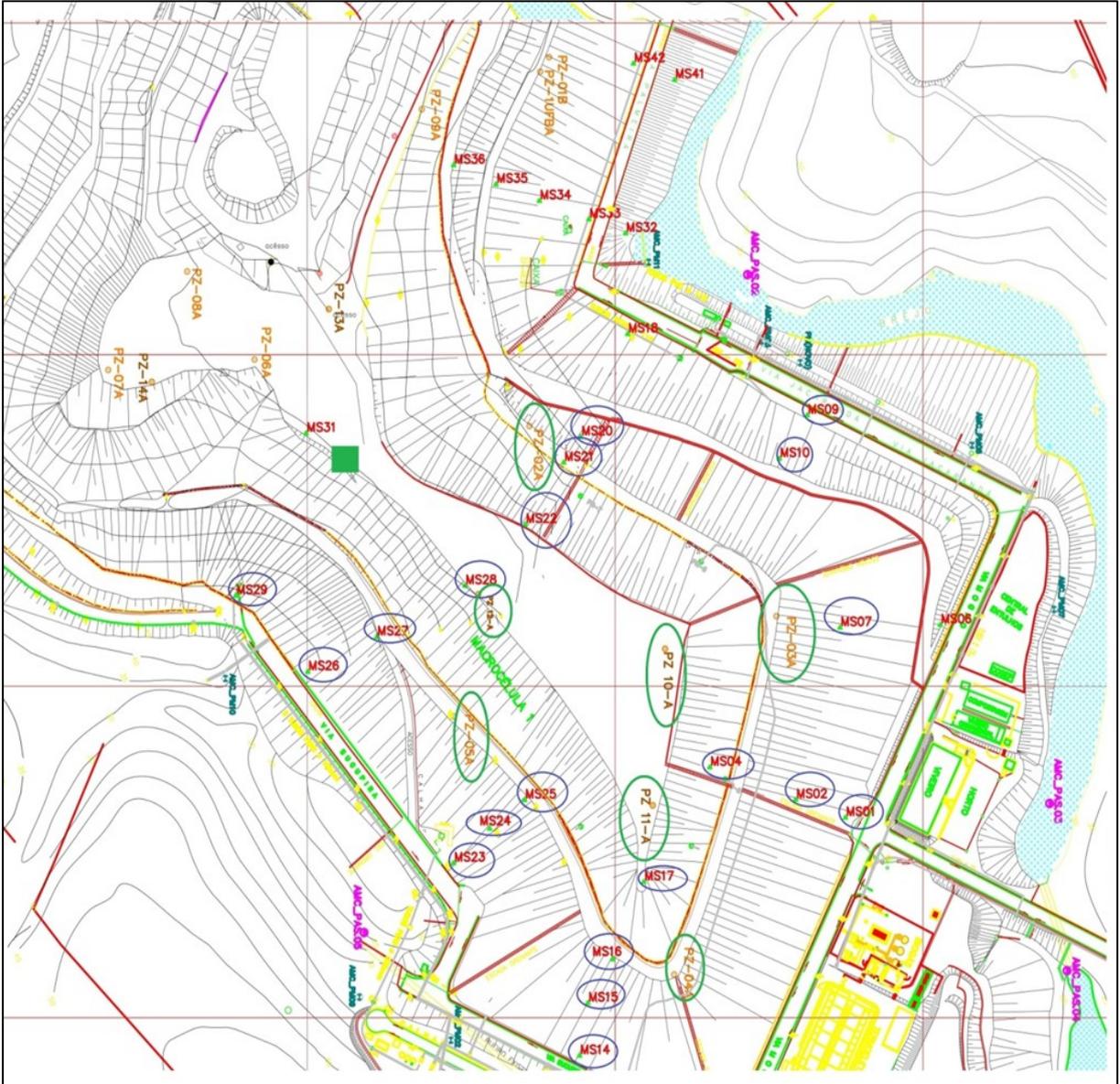


Figura 5-11 - Localização dos marcos superficiais (vermelho) e piezômetros (marrom) – destaque para marcos (círculo azul), piezômetros (círculo verde) e tanque de recirculação (quadrado verde) situados na macrocélula.

Fonte: A autora.

Os marcos superficiais foram distribuídos de forma a caracterizar seções de estudo, com direções de deslocamento esperadas, para possibilitar um monitoramento da evolução da movimentação do aterro e com isso nortear as ações preventivas que se façam necessárias para se manter o controle do maciço.

Os marcos superficiais são constituídos de uma base quadrada de concreto armado de 50 x 50 cm, em que há um pequeno pilar também de concreto armado, cuja parte superior possui instalado um pino metálico de 1" de diâmetro, que é utilizado como referência para as

medições topográficas. A Figura 5-12 apresenta croqui esquemático de alguns marcos instalados no ASMC.

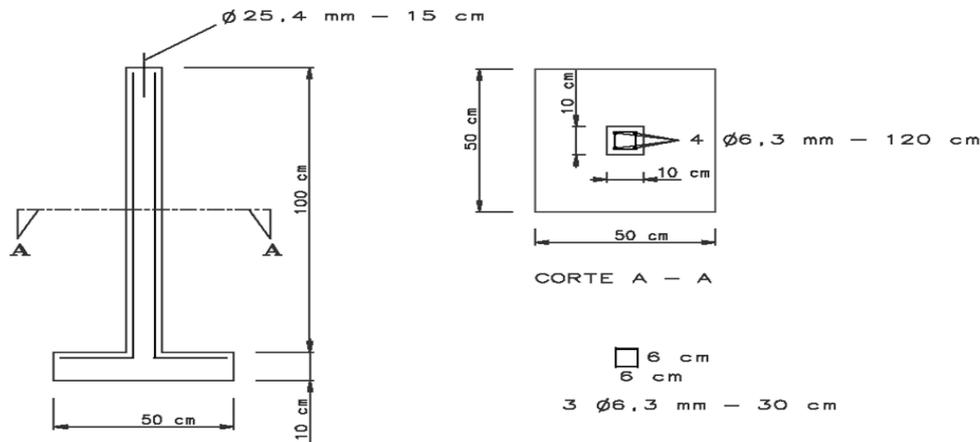


Figura 5-12 - Detalhes do marco superficial instalados no ASMC.

Fonte: A autora.

Com base nas leituras periódicas das coordenadas e cotas dos marcos superficiais (sempre em relação aos marcos de referência, localizados fora da área do aterro) são calculados os deslocamentos verticais e horizontais (parciais e acumulados) e suas respectivas velocidades médias de recalque e de deslocamento horizontal.

O Quadro 5-3 apresenta a listagem completa dos MS localizados na macrocélula, bem como suas respectivas coordenadas geográficas e cotas.

Ressalva-se que, sempre que é identificada alguma movimentação atípica ou inesperada são instalados marcos superficiais provisórios para acompanhar a movimentação e na medida do possível subsidiar alguma ação preventiva ou corretiva no sentido de manter a estabilidade do maciço. No caso do sistema de injeção de chorume estes marcos tiverem também a função de guiar a velocidade em que se deram os incrementos nas taxas de injeção. Conforme se verá adiante, em algumas oportunidades, logo após o incremento da taxa de injeção de chorume no maciço, houve alterações nos valores das taxas de deslocamento horizontal e/ou recalque, voltando-se para a taxa de recirculação de chorume aplicada anteriormente. A taxa de injeção de chorume atual do sistema de recirculação de chorume ($120 \text{ m}^3/\text{dia}$) corresponde a cerca de 14% da quantidade de chorume que é transportada diariamente do aterro para tratamento externo na CETREL (média de $845 \text{ m}^3/\text{dia}$).

Quadro 5-3– Localização dos marcos superficiais na macrocélula.

MARCOS	Localização dos marcos (coordenadas UTM)		Cotas (m)
	NORTE	LESTE	
MS-01	8.578.120,6007	568.749,5667	43,7203
MS-02	8.578.131,3818	568.717,2500	53,2997
MS-04	8.578.150,8150	568.661,3470	66,8175
MS-07	8.578.235,1430	568.746,1058	53,1013
MS-09	8.578.363,2810	568.724,8198	42,0400
MS-10	8.578.337,3366	568.706,7761	49,2555
MS-14	8.577.977,0539	568.577,0255	42,2505
MS-15	8.578.008,9115	568.582,2959	52,3298
MS-16	8.578.034,9653	568.598,7405	60,5307
MS-17	8.578.081,6780	568.618,5317	73,9100
MS-20	8.578.350,3748	568.577,6637	58,3181
MS-21	8.578.334,6810	568.566,5790	61,7498
MS-22	8.578.295,2915	568.545,2900	78,4934
MS-23	8.578.093,1844	568.495,1235	43,9578
MS-24	8.578.113,9013	568.518,4400	51,6102
MS-25	8.578.131,1408	568.540,9879	60,2879
MS-26	8.578.208,6198	568.400,2350	47,9627
MS-27	8.578.229,6422	568.444,9919	60,5388
MS-28	8.578.260,3528	568.502,1644	81,8712
MS-29	8.578.254,4344	568.353,5529	49,1777

Fonte: Dados de campo.

Além disso, para uma maior garantia da estabilidade do maciço de resíduos sólidos é de fundamental importância que não existam pressões neutras de grande magnitude no interior da massa de resíduos, pois elas diminuem as tensões efetivas e favorecem os mecanismos de escorregamento. Portanto, é vital que as condições de pressão interna sejam monitoradas no interior da massa dos resíduos depositados. No ASMC estas variáveis são monitoradas através dos piezômetros do tipo VECTOR, de dupla câmara, multiníveis. Estes piezômetros permitem avaliar, ao mesmo tempo, as pressões neutras de gás e de chorume no interior do maciço de resíduos sólidos, além da análise da presença de níveis intermediários de gás e chorume numa mesma seção do aterro (lençóis suspensos ou empoleirados de chorume).

O Quadro 5-4 apresenta a listagem completa dos piezômetros instalados na macrocélula, bem como suas respectivas coordenadas geográficas e cotas.

Quadro 5-4– Localização dos piezômetros na macrocélula.

Identificação	Localização dos piezômetros (coordenadas UTM)		Cotas (m)
	NORTE	LESTE	
PZ-02A	8.578.356,8681	568.544,7588	62,2829
PZ-02B	8.578.356,7873	568.544,8883	62,2579
PZ-03A	8.578.242,0441	568.705,0407	62,3454
PZ-03B	8.578.242,2287	568.704,9675	62,1242
PZ-04A	8.578.026,2158	568.638,4183	60,9899
PZ-04B	8.578.026,0881	568.638,4329	60,8260
PZ-05A	8.578.181,7267	568.494,7781	60,8410
PZ-05B	8.578.181,6825	568.494,7331	60,7295
PZ-10A	8.578.222,4607	568.632,7034	81,0715
PZ-10B	8.578.222,0674	568.632,6499	80,8756
PZ-11A	8.578.127,3476	568.624,4642	77,9099
PZ-11B	8.578.127,3846	568.624,5290	77,1075
PZ-12A	8.578.254,6159	568.510,3470	83,2076
PZ-12B	8.578.254,8330	568.510,7015	83,1518

Fonte: Dados de campo.

A Figura 5-13 apresenta croqui esquemático dos piezômetros instalados na macrocélula.

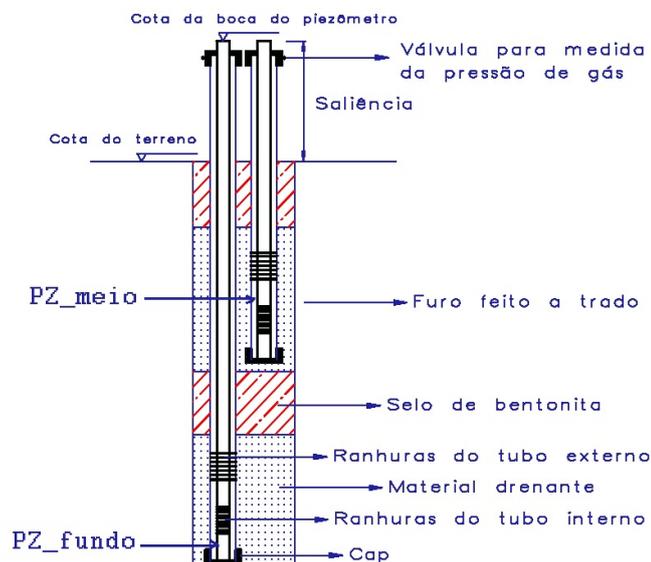


Figura 5-13 – Croqui piezômetros instalados na macrocélula.

O produto do monitoramento geotécnico é um relatório mensal, produzido pelo GEOAMB - UFBA, em que constam as informações referentes ao:

- Recalque parcial: mede o recalque efetivado entre duas leituras sucessivas, permitindo assim uma avaliação dos deslocamentos verticais em situações imediatas às suas ocorrências. Esta medida permite a adoção de ações de caráter emergencial no caso da ocorrência de deslocamentos que se julguem serem anormais para este local.
- Recalque acumulado: mede o deslocamento total efetuado desde a data de instalação até a data da leitura. Possibilita a construção de um histórico do marco estudado, além da análise das suas características de deslocamento, ou seja, se estes tendem para uma situação estável ou se ainda possuem movimentações consideradas de risco.
- Deslocamento horizontal parcial: É dado pelo vetor deslocamento horizontal definido entre duas posições sucessivas do marco, projetado na direção perpendicular ao talude.
- Deslocamento horizontal acumulado: Os valores positivos dos deslocamentos horizontais indicam uma movimentação do talude no sentido de dentro para fora do maciço, o que pode representar um processo de instabilização. Os valores negativos representam que os marcos estão adentrando para o interior das células, o que pode indicar uma redução de volume do maciço.
- Velocidade parcial de recalque: calculada através da divisão do recalque parcial e o tempo decorrido entre elas. Esta medida caracteriza com maior critério os deslocamentos observados no aterro, agilizando desta forma a definição das ações passíveis de serem tomadas no caso da ocorrência de situações adversas ao normalmente observado.
- Velocidade média de recalque: calculado através da divisão do recalque total, medido entre a última leitura e a leitura do dia de instalação do marco, e o tempo decorrido entre elas.
- Velocidade parcial de deslocamento horizontal: Calculada através da divisão do deslocamento parcial horizontal, medido entre duas leituras sucessivas e o tempo decorrido entre elas. É equivalente à velocidade parcial de recalque, e também deverá ser o parâmetro utilizado na definição do tempo decorrido entre duas leituras consecutivas.
- Velocidade média de deslocamento horizontal: calculado através da divisão do

deslocamento parcial entre duas datas sucessivas e o tempo decorrido entre elas. Tal parâmetro atua como um complemento ao valor “deslocamento horizontal acumulado”, pois sendo o deslocamento horizontal um parâmetro em que o fator tempo não é considerado, a análise dos deslocamentos podem ser equivocadas, já que os períodos de análise nem sempre são os mesmos. Já a velocidade de deslocamento, analisada em mm/dia, mostra a uma tendência de deslocamento num determinado período, portanto caracteriza com maior critério os deslocamentos observados no aterro, agilizando desta forma a definição das ações passíveis de serem tomadas no caso da ocorrência de situações adversas ao normalmente observado.

- Porcentagem de recalque: calculado através da divisão do recalque acumulado até determinada data de leitura e a espessura original de resíduos existentes sob o marco analisado quando de sua instalação. Este parâmetro funciona como um indicador do estágio de decomposição em que se encontram os resíduos e se está na zona dos recalques primários ou secundários, além de ser uma ferramenta na avaliação das deformações volumétricas sofridas pelo aterro.
- Coluna de chorume: este parâmetro só tem significado físico para o nível de chorume medido nas câmaras mais profundas, próximas da base do aterro (câmara A). Para as outras câmaras a ocorrência de nível de chorume pode indicar a existência de lençóis empoleirados e, neste caso, não haveria como se avaliar a coluna de lixiviado retida no maciço. Para o caso das câmaras mais profundas, este parâmetro representa a diferença entre a cota do nível de chorume e a cota da base do aterro.
- Pressão de biogás: expressa o valor da pressão de gás dentro do maciço de resíduos sólidos, medido conjuntamente ao nível de chorume nos piezômetros tipo VECTOR. As pressões de gás dentro do maciço são ainda mais preocupantes que as de líquido, pois são menos estáveis e difíceis de serem controladas. Valores de pressão de gás da ordem de 10 kPa já necessitam de acompanhamentos mais rigorosos.
- Cota do nível de chorume: determinado a partir da cota da boca do piezômetro subtraída da leitura da sonda (comprimento medido da boca do piezômetro até o nível do chorume). Caso a cota do chorume medido se situe abaixo da parte inferior da faixa drenante do tubo externo do piezômetro, este não será considerado como a cota real do chorume e será identificado nas tabelas em anexo como N.D. - “Não Determinado”.

Todos os parâmetros analisados citados são utilizados para a interpretação dos resultados de campo, podendo sofrer alterações de periodicidade ao longo do monitoramento, de forma a melhor traduzir a avaliação técnica do que ocorre no maciço de RSU na macrocélula.

Além da medida da pressão do biogás e do nível de chorume nos piezômetros VECTOR instalados em campo, diariamente às 9h da manhã é iniciada a medição do nível de chorume nos drenos instalados na macrocélula.

5.6. Medição do nível de chorume nos drenos e da pressão do biogás

Manualmente o técnico de campo efetua a leitura do nível através de um sensor indicador de nível. Na ponta do equipamento encontra-se um sensor que ao atingir a fase líquida emite um alarme sonoro (Figuras 5-14 e 5-15). Este equipamento é similar ao utilizado pela equipe do GEOAMB - UFBA.



Figura 5-14 – Medidor de nível – destaque para sensor.



Figura 5-15– Medidor de nível

O processo de medição é simples: de posse do medidor de nível e da prancheta para anotação dos valores encontrados o técnico de campo localiza o dreno desejado, retira o CAP do dreno, insere o medidor de nível de maneira a evitar que o mesmo encoste nas paredes do dreno e calmamente vai dando continuidade até que o alarme sonoro seja emitido.

Neste momento ele verifica na lateral do medidor a distância percorrida, determinando assim a altura em que se encontra o chorume.

Para determinar o nível de chorume, efetua-se um simples cálculo envolvendo a cota da boca do dreno e a medição encontrada. (Figuras 5-16 a 5-18).



Figura 5-16 – Inserção do medidor de nível no dreno

Fonte: A autora.



Figura 5-17 – Ajuste do sensor no dreno

Fonte: A autora.



Figura 5-18– Verificação do nível de chorume no dreno

Fonte: A autora.

5.7. Limpeza do tanque de chorume

Periodicamente são necessárias intervenções nos drenos de injeção de chorume a fim de proceder com a limpeza das paredes do tanque de chorume, assim como algumas partes internas do sistema. Essa sistemática torna-se necessária em função das incrustações, que dificultam o escoamento do chorume, aumentando a perda de carga no sistema que funciona por gravidade.

A limpeza é realizada com auxílio de um caminhão a vácuo conforme pode ser observado na Figura 5-19.



Figura 5-19 – Procedimento de limpeza do tanque de chorume

Fonte: A autora.

5.8. Instalação de hidrômetro

A fim de melhorar a confiabilidade das medições foi instalado um hidrômetro (comumente utilizado para medição de água) na saída do tanque de chorume (Figura 5-21). Para isso foi criado um desvio da linha conforme ilustrado na Figura 5-20.

Após a instalação do hidrômetro, contudo, verificou-se que houve uma elevação da perda de carga no sistema, onde a injeção de chorume, que ocorre por diferença de gravidade, teve seu tempo de residência ampliado em 55 minutos. Outra consequência observada foi a ausência de chorume em cinco drenos (DP88, DP91, DP92, DP93 e DP94).



Figura 5-20 – Local da instalação inicial do hidrômetro.

Fonte: A autora.



Figura 5-21 – Hidrômetro instalado.

Fonte: A autora.

Para evitar tais efeitos negativos, foi desinstalado o hidrômetro e o mesmo foi recolocado na entrada no tanque de chorume. Após a relocação do hidrômetro foi observada o retorno da normalidade do sistema, diminuição da perda de carga e chegada do chorume em todos os drenos.

Ao atingir a vazão diária de 50 m^3 o hidrômetro começou a apresentar problemas de leitura e obstrução, tornando-se um gargalo para o sistema. Assim, ele foi retirado da linha e a vazão passou a ser acompanhada em função de cálculos e manobras operacionais. Destaque-se que, como o volume do tanque de injeção de chorume é conhecido (10 m^3) torna-se fácil a determinação do volume injetado na macrocélula.

6. Resultados e discussões.

6.1. Disposição de RSU no ASMC.

As Figuras 6-1 e 6-2 apresentam a evolução mensal e anual (respectivamente) das massas de RSU depositadas no ASMC. Analisando o gráfico percebe-se que há uma sazonalidade nos valores mensais, havendo picos nos meses associados com o afluxo de turistas nas temporadas de festas na cidade, estando de acordo com o estudo realizado por Machado (2009).

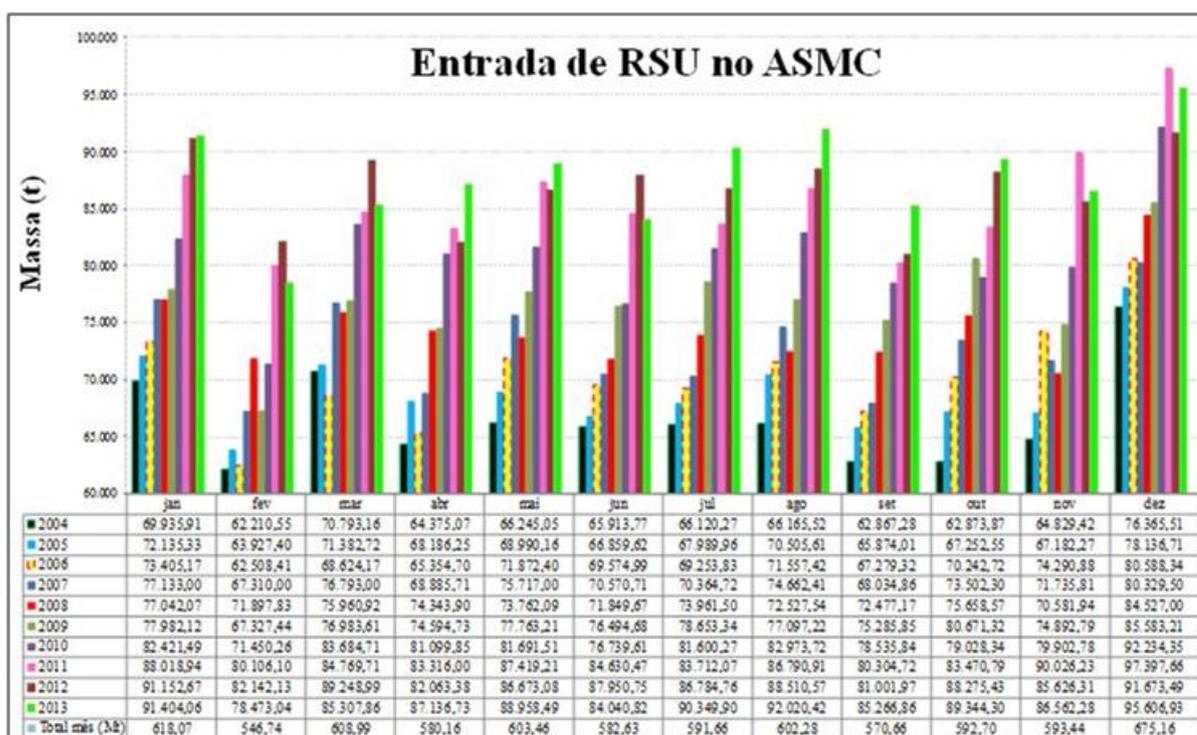


Figura 6-1 – Evolução mensal das massas de resíduos dispostas no ASMC.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

A Figura 6-2 apresenta a evolução das massas de RSU aterradas no ASMC, bem como a estimativa da população atendida pelo aterro com base nas informações fornecidas pelos Censos IBGE e o índice de tonelada de RSU aterrado por milhões de habitantes.

Com base nessas informações é possível observar a que mesmo com a redução da população atendida durante os anos de 2010 a 2012 a massa de RSU disposto no ASMC cresceu percentual médio de 4% durante este mesmo período.

Curiosamente, em 2013, houve uma elevação da população atendida, todavia foi registrada uma estabilização da massa de RSU aterrada, o que acarretou numa redução do índice de tonelada de RSU disposta por milhões de habitantes atendidos.

O município de Lauro de Freitas foi o que mais contribuiu para a estabilização da massa de RSU aterrada, cujo envio anual de RSU para o ASMC foi de 82.709 toneladas, ou seja, 3% a menos que o registrado em 2012 (vide Quadro 6-2).

Com base no Quadro 6-1 observa-se que o Município de Salvador foi o responsável pela redução expressiva da população total atendida entre os anos de 2010 a 2013, onde mesmo com o retorno do crescimento populacional em 2013 a cidade continua com o número de habitantes abaixo do registrado em 2010.

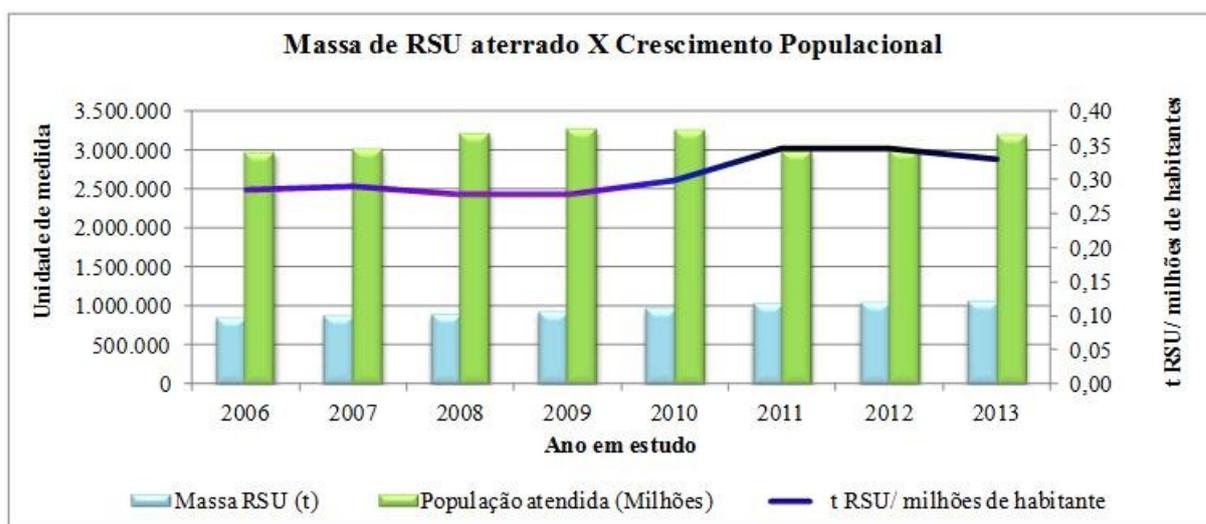


Figura 6-2 – Evolução anual das massas de resíduos dispostas no ASMC.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

Quadro 6-1– Estimativa da população atendida pelo ASMC.

	Estimativa da população: Base IBGE (Milhões)							
	Anos							
Município	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006
Lauro de Freitas	184.383	171.042	167.309	157.940	156.936	153.016	148.342	146.150
Salvador	2.883.682	2.710.968	2.693.606	2.978.868	2.998.056	2.948.733	2.754.728	2.714.018
Simões Filho	129.964	121.416	119.760	117.409	116.662	114.649	111.579	109.930
Total	3.198.029	3.003.426	2.980.675	3.254.217	3.271.654	3.216.398	3.014.649	2.970.098

Fonte: Dados IBGE - Autora.

Quadro 6-2– Detalhamento das contribuições de RSU dispostos no ASMC.

	RSU aterrado ASMC (toneladas)							
	Anos							
Município	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006
Lauro de Freitas	82.709	84.997	82.025	74.068	67.864	62.611	58.954	56.637
Salvador	947.512	933.601	924.338	875.378	841.516	810.298	795.073	767.025
Simões Filho	24.521	22.505	23.600	21.916	13.950	21.556	21.017	20.782
Total	1.054.743	1.041.104	1.029.963	971.363	923.330	894.466	875.044	844.445

Fonte: Dados de Campo - Autora.

Voltando a análise especificamente para a Macro célula têm-se então a Figura 6-3 que apresenta a evolução mensal das massas de RSU depositadas ao longo dos anos, com detalhamento dos RSU dispostos durante a operação da macro célula (1997 a 2003) e do montante disposto durante o retorno da operação (setembro de 2004 a maio de 2005; Setembro 2009 a outubro de 2010), em que foram dispostos um total de 4.658.145,86 toneladas de RSU.

Destaca-se que das 4.658.145,86 toneladas de RSU, 745.273,71 toneladas foram dispostas na Célula 1 (16%), 514.634,53 toneladas na Célula 2 (11%), 224.033,43 toneladas na junção C1-C2 (5%) e 3.174.204,19 toneladas na Célula 3, Célula 4 e junção Cel.1/2 com Cel.3/4 (66%) conforme apresentado na Figura 6-4.

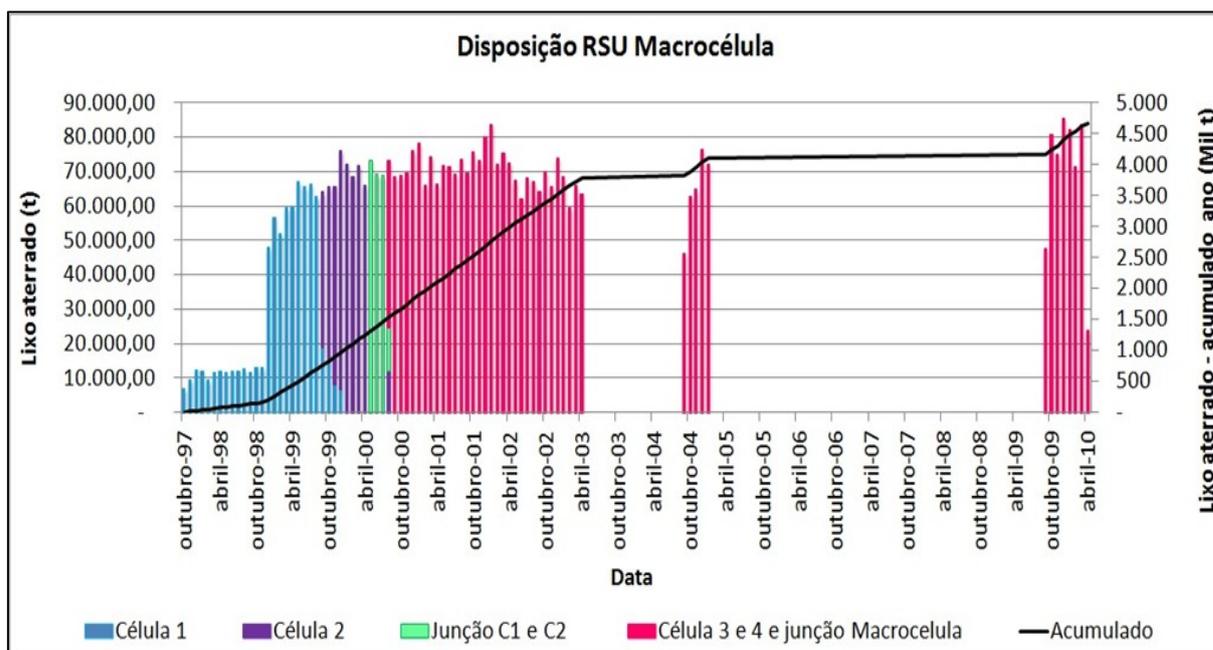


Figura 6-3 – Evolução das massas de RSU aterradas na macro célula.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

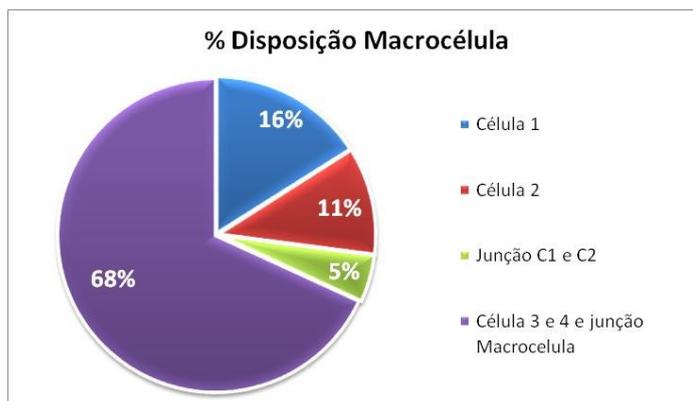


Figura 6-4 – Distribuição percentual dos RSU aterradas na macrocelula.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

6.2. Caracterização do chorume.

A Figura 6-5 apresenta os resultados das análises laboratoriais realizadas no chorume utilizado na aplicação da técnica de recirculação, ou seja, proveniente das bacias de contenção que receberam contribuições de todo ASMC e posteriormente seguiram, via carretas, para tratamento externo na CETREL. Os dados apresentados referem-se ao período compreendido entre janeiro de 2009 até dezembro de 2013. Os valores expressos são correspondentes a médias mensais de cada parâmetro analisado.

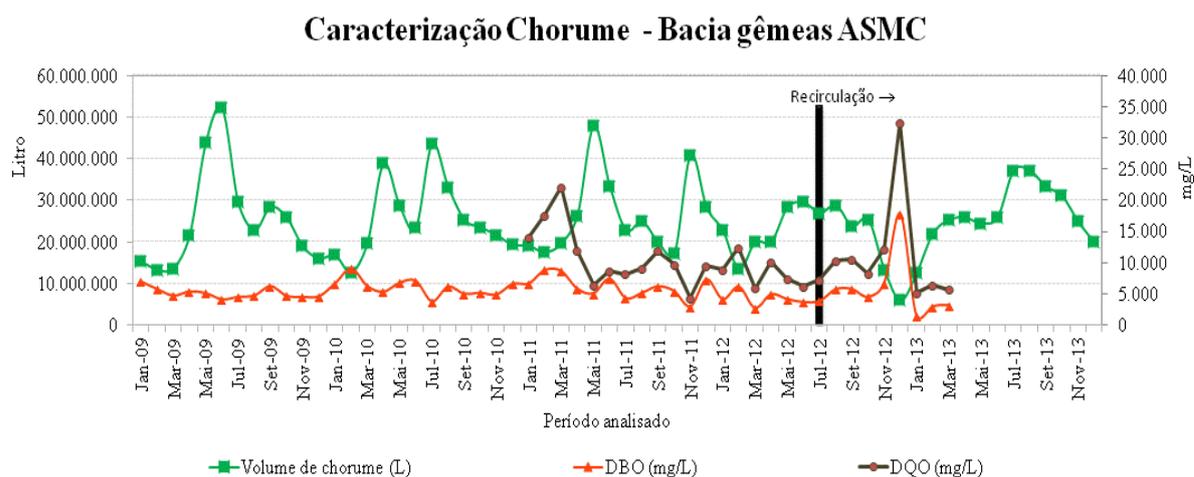


Figura 6-5 – Caracterização do chorume bacias de contenção – destaque em amarelo para fase com recirculação de chorume.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

Com base na Figura 6-5 é possível observar que para este caso específico não há uma relação direta entre o volume de chorume e a DBO. Isso muito em função das manobras operacionais necessárias para o enquadramento da qualidade e do volume de chorume enviado via carretas para a CETREL; bem como ao fato das bacias não possuírem proteção contra intempéries. Somente em meados de 2012 que foi introduzida ao sistema uma bacia com tal proteção – a bacia envelopada.

É nítida a relação DBO/DQO, bem como a tendência de estabilização destes parâmetros com o início da operação da bacia envelopada conforme apresentado na Figura 6-6. Observa-se uma conformidade dos valores registrados de DBO, uma vez que quando comparado os resultados dos primeiros nove meses de operação da bacia envelopada com o mesmo período do ano anterior têm-se uma média de 4.674,29 mg/L (antes da bacia envelopada) e 4.208,59 mg/L (após a bacia envelopada), ou seja, uma redução de 5%.

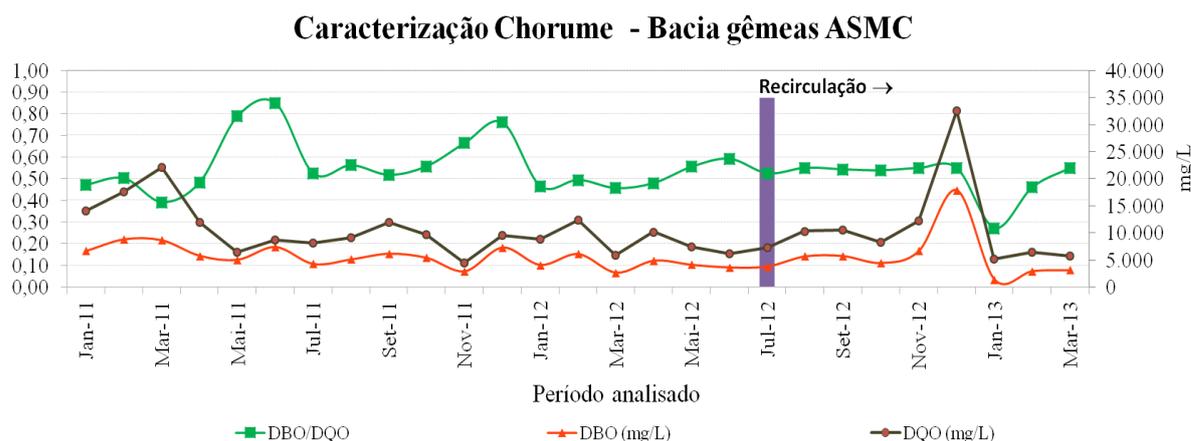


Figura 6-6 – Relação DBO/DQO do chorume bacias de contenção.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

Registrou-se também uma sutil redução das médias de volume de chorume ao longo dos anos: 24.773,25 m³ em 2009, 27.127,24 m³ em 2010, 26.340,22 m³ em 2011 e 23.515,79 m³ em 2012 (com recirculação).

Tomando como base a caracterização típica de chorume apresentada por Pohland e Harper (1985) torna-se possível afirmar que o chorume analisado (bacias) é compatível com chorume característico de aterros em fases acidogênica e metanogênica.

Outra forma de ratificar esta informação é seguindo o apresentado por Robinson (1993), cujo valor de referência para mudança de fase da digestão anaeróbia seria DBO/DQO igual a 0,4, sendo que, valores acima deste representariam a fase acidogênica e abaixo deste seria metanogênica (Vide Quadro 6-3). Em função da bacia de contenção receber contribuições em regime contínuo de todo o ASMC não é possível proceder com uma classificação direta a fim de determinar a fase de digestão anaeróbia em que se encontra a Macro célula e/ou do próprio ASMC.

Quadro 6-3– Comparação qualitativa chorume bacias e dados encontrados na literatura.

Dados Literatura					
	Parâmetros	Fases do aterro			
		Transição	Acidificação	Metanogênese	Final
Pohland <i>and</i> Harper (1985)	DBO (mg/L)	100 – 10.900	1.000-57.700	600-3.400	4-120
	DQO (mg/L)	480-18.000	1.500-71.100	580-9.760	31-900
	DBO/DQO	0,23-0,87	0,4-0,8	0,17-0,64	0,02-0,13
Dados de Campo ASMC – Médias anuais					
Bacias ASMC	Parâmetros/ Análise	2010	2011	2012	2013
	DBO (mg/L)	5.791,92	6.142,58	4.502,92	3.376,20
	DQO (mg/L)	---	11.360,61	8.613,97	7.738,14
	DBO/DQO	---	0,54	0,52	0,44

Obs.: Chorume oriundo de uma célula com recirculação de chorume em RSU com aproximadamente 5 anos de aterramento.

Fonte: A Autora.

Em virtude das bacias de contenção não possuírem coberturas ou sistema de proteção pluviométrica, torna-se interessante analisar o comportamento pluviométrico na região durante o período analisado, de forma a verificar se no período analisado ocorreram influencias significativas da chuva no volume de efluentes do ASMC.

Para isto, foram levantados os dados pluviométricos registrados no período através da estação meteorológica existente e relacionados com os volumes de chorume armazenados no período gerando assim o gráfico apresentado na Figura 6-7. Com base nessa Figura percebe-se que a maioria dos picos de volume de chorume registrados durante o período sem aplicação da técnica de recirculação e início da operação de bacia envelopada foi precedido de intensa precipitação. Após o início da operação da bacia envelopada os volumes de chorume

mantiveram-se mais estáveis e dentro da média. Também não foram registradas precipitações significativas, uma vez que os índices pluviométricos registrados no período foram mais baixos.

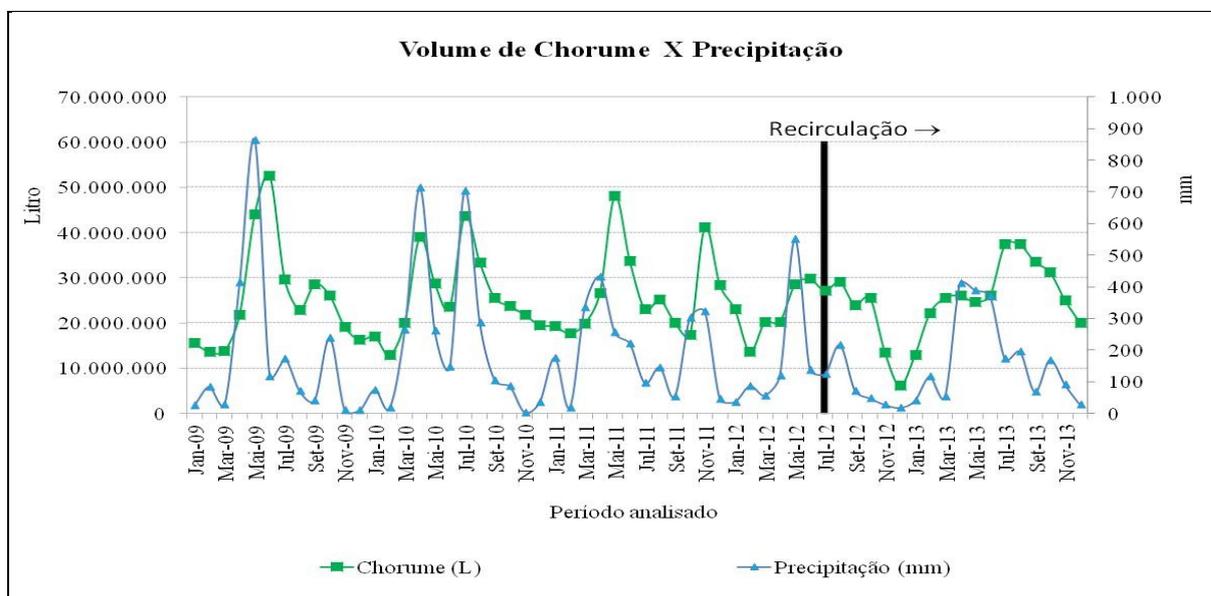


Figura 6-7 – Relação volume de chorume x precipitação.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

Além das análises das bacias e conseqüentemente das carretas, procedeu-se com o monitoramento qualitativo do chorume em pontos específicos da Macro célula, conforme já apresentado na Figura 6-4. Os resultados das análises laboratoriais realizadas nestes pontos estão apresentados em apêndice. Todo processo de amostragem e coleta foi realizado pela equipe da empresa CETREL e acompanhada pelos técnicos da BATTRE e GEOAMB. A Figura 6-8 apresenta o agrupamento de quatro gráficos contemplando os resultados obtidos para os parâmetros pH, DQO e condutividade nos pontos localizados na Macro célula.

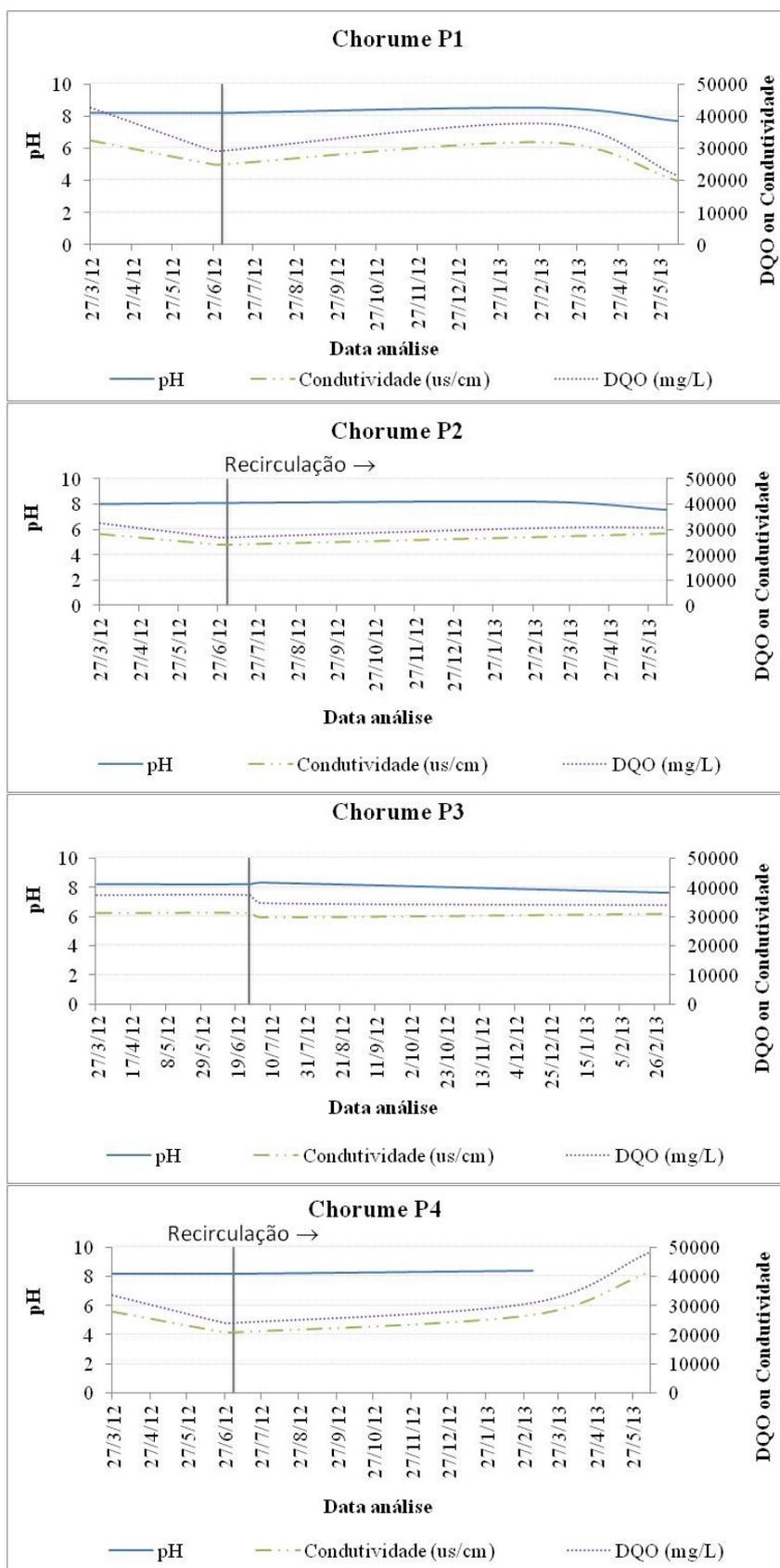


Figura 6-8 – Caracterização do chorume: pH, DQO e Condutividade – Pontos P1, P2, P3 e P4.

Fonte: Dados de Campo.

Como a análise da DQO tem a finalidade de medir a quantidade de oxigênio necessária para a oxidação da matéria orgânica e das substâncias inorgânicas presentes no despejo chorume por ação de um poderoso agente oxidante químico, pode-se dizer então que a variação da DQO em relação ao tempo de aterramento expressa o rendimento da atividade microbiana ativa. Assim, acredita-se que na região dos pontos P1 e P4 ocorreu uma reativação da atividade microbiana durante a aplicação da técnica de recirculação de chorume, uma vez que ao longo do período estudado este parâmetro apresentou alterações significativas.

Observa-se que nas regiões dos pontos P2 e P3 não foram evidenciadas alterações com a recirculação, em que os valores permaneceram estáveis. Observa-se também que a partir de abril de 2013 a DQO iniciou uma tendência de decréscimo na região do P1.

A variável condutividade também sofreu interferência com a recirculação, diferentemente do pH que não apresentou alterações significativas em nenhum dos pontos analisados.

Destaca-se que o comportamento na região do P1 é compatível com as idades de aterramento dos RSU, já que nas proximidades desse ponto de coleta encontra-se aterrado os resíduos sólidos recentes e localizado o MS-17 que apresentou recalques acentuados no período analisado.

A Figura 6-8 apresenta os resultados dos parâmetros pH, DQO e condutividade para os pontos P5 e P6. Estes pontos foram inseridos no grupo de amostragem após o início da operação do sistema de recirculação de chorume. O objetivo da inserção foi atrelado à necessidade de investigação qualitativa do chorume recirculado após a injeção deste na macrocélula, após ele ter percorrido completamente o maciço de RSU e antes dele chegar a bacia. Cabe ressaltar que em virtude de renovações contratuais com a empresa responsável pela coleta e análise, estes dois pontos foram monitorados apenas durante o período compreendido entre março a junho de 2013.

Com base na Figura 6-9 e no Quadro 6-4, observa-se que o chorume coletado nesses pontos apresenta valores superiores aos demais pontos da macrocélula e bem parecidos com os valores registrados nas bacias de contenção. A exceção ficou por conta dos parâmetros pH e Cloretos, que se mantiveram dentro da faixa registrada para os demais pontos.

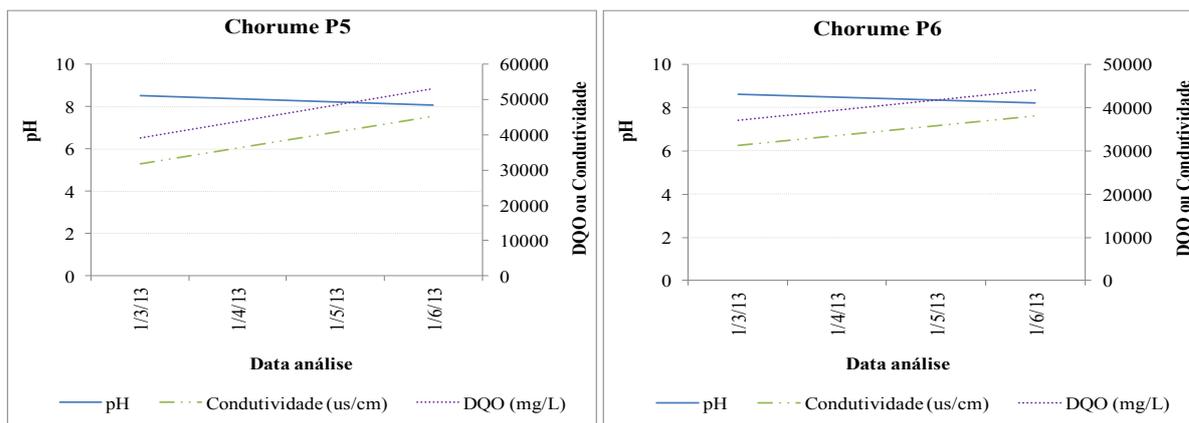


Figura 6-9 – Caracterização do chorume: pH, DQO e Condutividade – P5 e P6.

Fonte: Dados de Campo.

De forma geral a análise qualitativa do chorume recirculado na Macro célula encontra-se com valores próximos aos de alguns encontrados na literatura. Destaca-se que os valores listados na literatura são referentes ao chorume cru, sem passar pela técnica de recirculação de chorume, uma vez que não foram identificadas fontes similares ao estudo em questão, com exceção do Aterro de Muribeca em Pernambuco (BARALDI, 2003), o que impossibilitou acrescentar mais fontes de referência no Quadro 6-4 que apresenta esta comparação.

Quadro 6-4– Comparação qualitativa chorume Macro célula e dados encontrados na literatura.

Ponto	ASMC - Dados de Campo (médias)						Baraldi (2003)			
							Muribeca		EPA (1987)	Gramacho (1994)
	Baraldi (2003)*	Paes (2003)**								
pH	P1	P2	P3	P4	P5	P6	8,6	8,3	3,5 - 8,5	8,2
Condutividade (us/cm)	27.313	26.948	30.753	29.353	38.475	34.670	25.100	60-843	960 - 16.300	
DQO (mg/L)	5.386	3.325	4.508	4.855	7.649	5.862	4.196,10	1.095-37.900	50-90.000	7.000
Cloreto (mg/L)	2.063	2.001	2.222	2.117	4.132	2.112	3.250	3.683	30-5.000	9.090
Sólidos Totais dissolvidos (mg/L)	6.864	7.003	7.982	6.797	13.100	6.180	12.500		725-55.000	27.281

* Chorume oriundo de uma célula com recirculação de chorume em RSU com aproximadamente 5 anos de aterramento.

** Chorume oriundo de uma célula com recirculação de chorume em RSU com idade semelhante aos da Macro célula.

Fonte: A Autora.

6.3. Monitorização dos níveis de chorume na Macro célula.

A Figura 6-10 apresenta os valores dos níveis de chorume dentro dos maciços de RSU registrados através dos piezômetros localizados na macro célula. Através dela é possível relacionar os valores registrados antes e durante o período de recirculação do chorume. Aparentemente a aplicação da técnica não influenciou nas colunas de chorume, com exceção dos PZ-2A e PZ-12-A que registraram comportamentos opostos.

O PZ-2A após o início da técnica de recirculação registrou valores mais baixos, saindo de um valor médio de 18 m para 9,73 m. Possivelmente as movimentações (recalques e deslocamentos horizontais) formaram novas opções rota drenante para o chorume desta região do maciço.

O PZ-12A, após o início da recirculação passou a registrar uma média 27 m (média anterior = 24 m), tal comportamento pode sugerir a existência de uma região com dificuldade de infiltração dos líquidos injetados pelo sistema de recirculação.

Destaca-se que durante a pesquisa não foram encontrados trabalhos publicados com esta informação detalhada, impossibilitando assim uma análise comparativa com outros estudos.

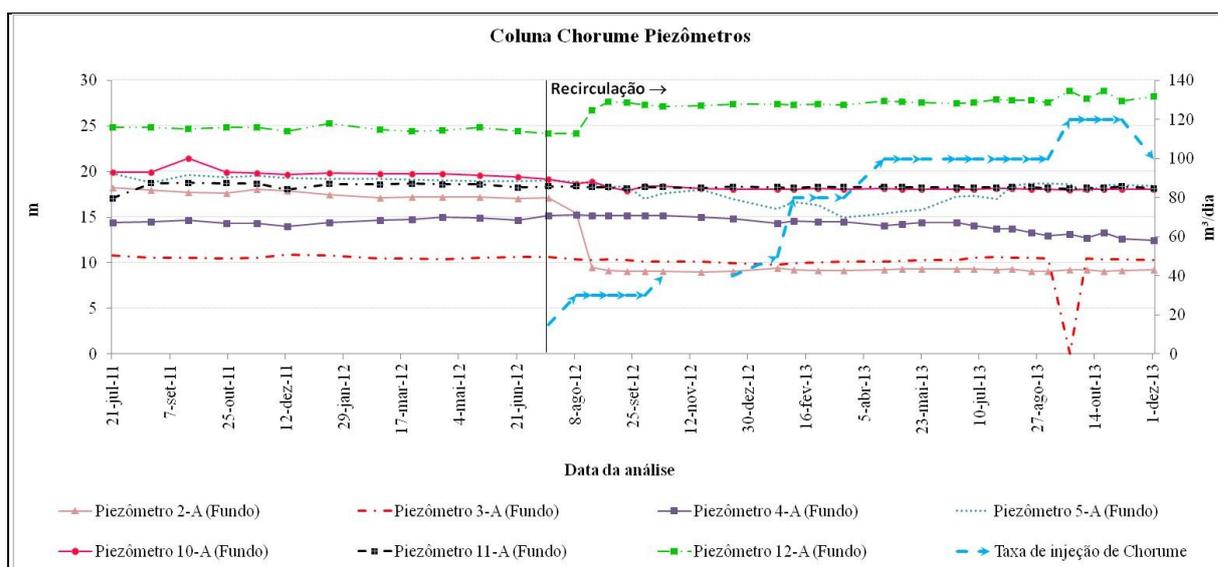


Figura 6-10 – Volumes de chorume – piezômetros macro célula.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

6.4. Monitorização da pressão do biogás.

Conforme já explanado o aterro conta com sete piezômetros (PZ) instalados na macrocélula, onde cada piezômetro possui câmaras internas que possibilitam leituras em cotas diferenciadas. A seguir são apresentados os dados de pressão do biogás registrados ao longo do período estudado.

Os PZ-03, PZ-04 e PZ-05 estão instalados nas áreas com resíduos antigos e os PZ-02, PZ-10, PZ-11 e PZ-12 estão em áreas onde foram dispostos os resíduos mais recentes. Não foram notadas alterações significativas nos comportamentos dos PZ-03, PZ-04, PZ-10 e PZ-11 com a aplicação da técnica de recirculação do chorume, conforme pode ser observado nas Figuras 6-11 a 6-14.

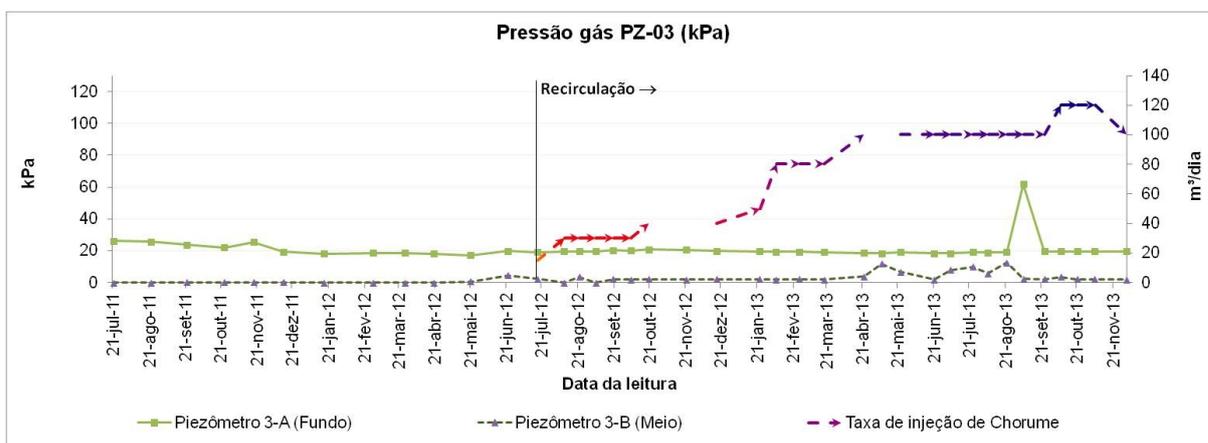


Figura 6-11 – Pressão Biogás PZ-03.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

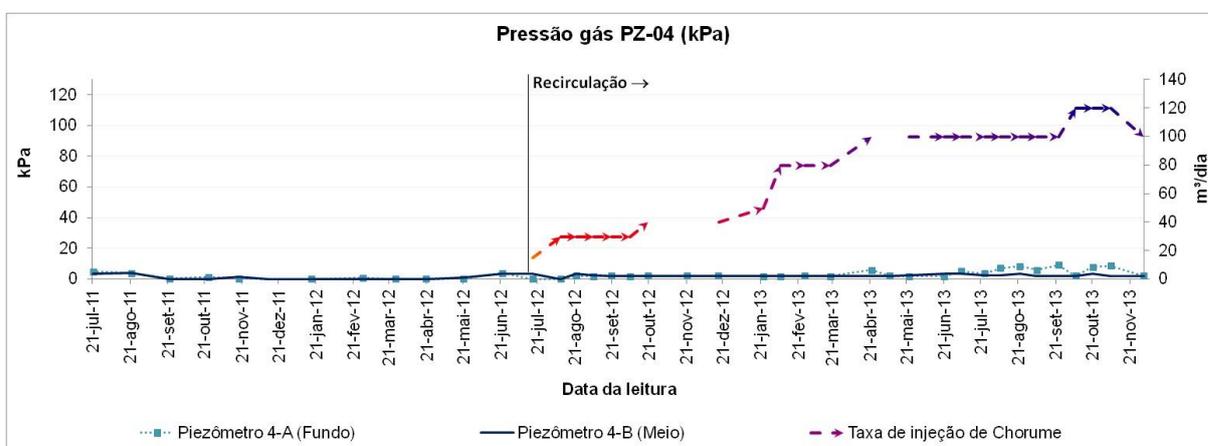


Figura 6-12 – Pressão Biogás PZ-04.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

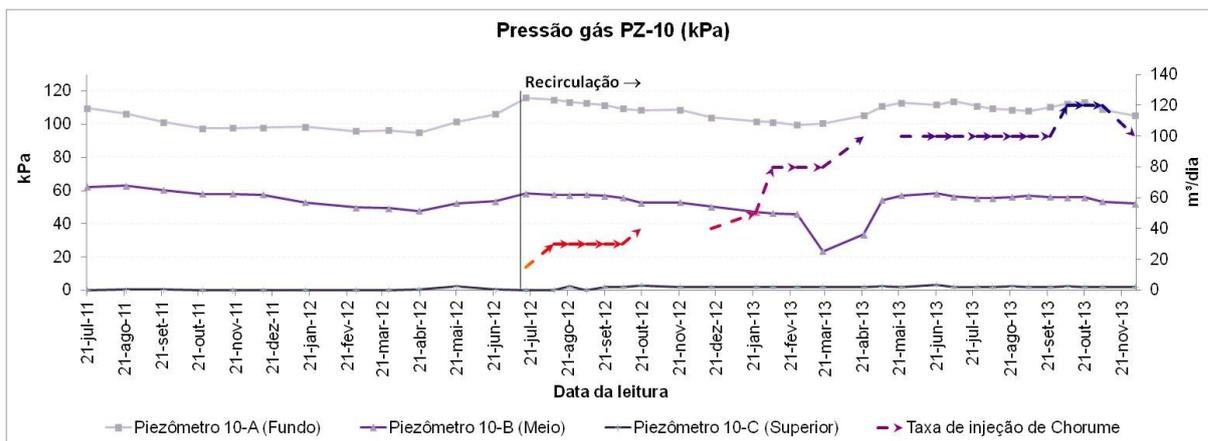


Figura 6-13 – Pressão Biogás PZ-10.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

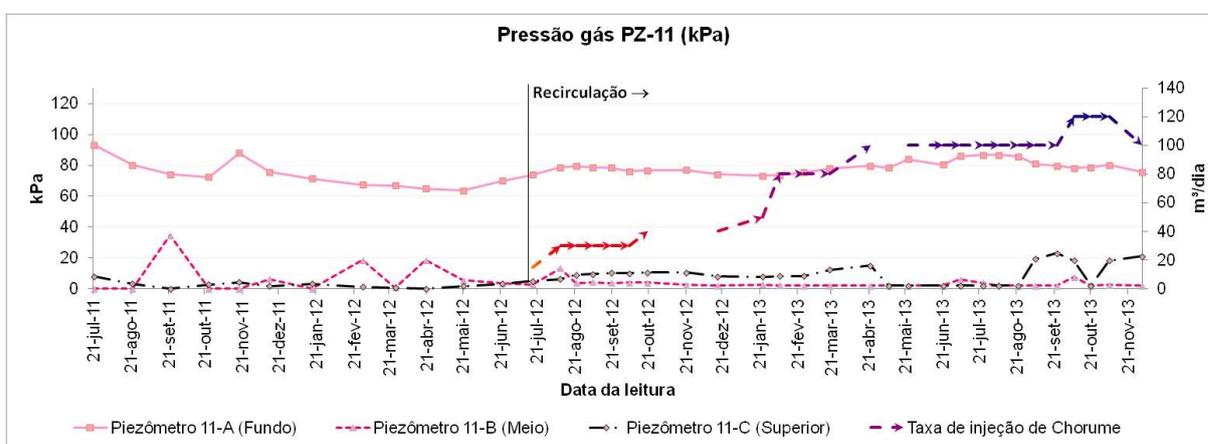


Figura 6-14 – Pressão Biogás PZ-11.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

No PZ-05 observou-se um acréscimo na pressão do biogás (fundo) com o início da aplicação da técnica de recirculação. A interferência foi mais intensa a partir da adição dos 40 m³/dia até os 80 m³/dia. Após foi registrado uma queda progressiva dos níveis de pressão. No fim do período analisado, cuja injeção de chorume já alcançava os 120 m³/dia, a pressão média do biogás registrada estava na faixa dos 2 kPa, valor este muito similar ao período antecedente a aplicação da técnica de recirculação, conforme apresentado na Figura 6-15.

Relacionando a pressão do biogás com o nível da coluna de chorume apresentado na Figura 6-9, nota-se que no mesmo período da elevação dos níveis de pressão no PZ-5A foi registrada uma redução acentuada nos níveis de chorume, o que sugere uma relação inversa entre as duas variáveis (pressão X Coluna de chorume).

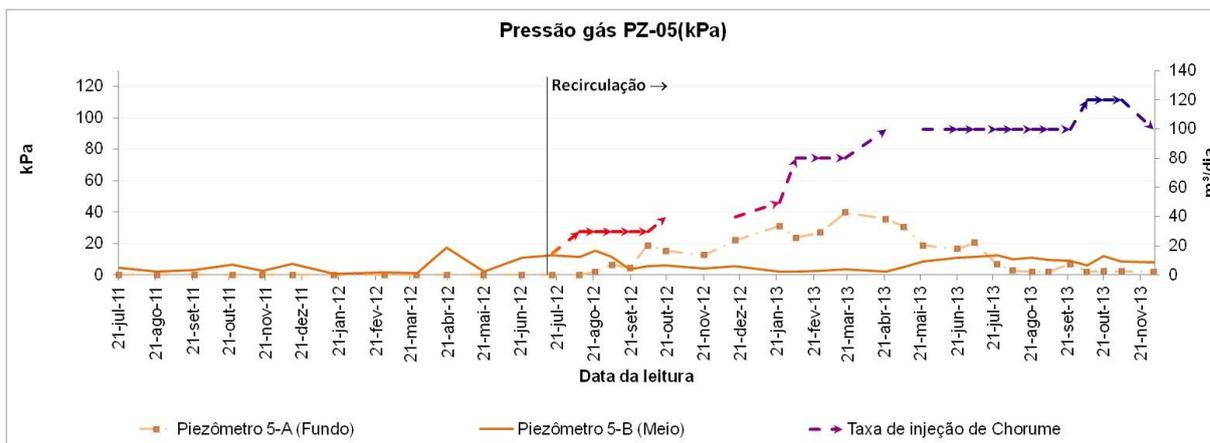


Figura 6-15 – Pressão Biogás PZ-05.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

A Figura 6-16 apresenta o comportamento registrado através do PZ-02. Após o início da recirculação, quando a vazão recirculada de chorume estava em $40\text{m}^3/\text{dia}$, observou-se que a pressão no PZ de fundo cresceu bruscamente (de $0,6\text{ kPa}$ para 60 kPa), todavia tal comportamento manteve-se estável até o fim do período analisado, cuja a vazão de injeção já estava em $120\text{ m}^3/\text{dia}$. Acredita-se que tal comportamento esteja associado com a redução acentuada da coluna de chorume nesta região (vide Figura 6-10), ou seja, as movimentações do maciço culminaram na elevação da pressão do biogás que teriam impulsionado o chorume para outras rotas ou caminhos preferenciais.

No mesmo período o PZ-12 registrou comportamento oposto ao PZ-02. Conforme ilustrado na Figura 6-17, onde a pressão do PZ-12A saiu de uma média de 56 kPa para uma média de 21 kPa .

Considerando que na região do PZ-12, durante esse período, a coluna de chorume cresceu na mesma proporção que o decréscimo registrado na coluna de chorume do PZ-02 (Figura 6-10), aliado ao fato dos PZ em questão estarem localizados no mesmo alinhamento (um de frente para o outro), acredita-se que estes fenômenos estejam relacionados à mesma movimentação do maciço.

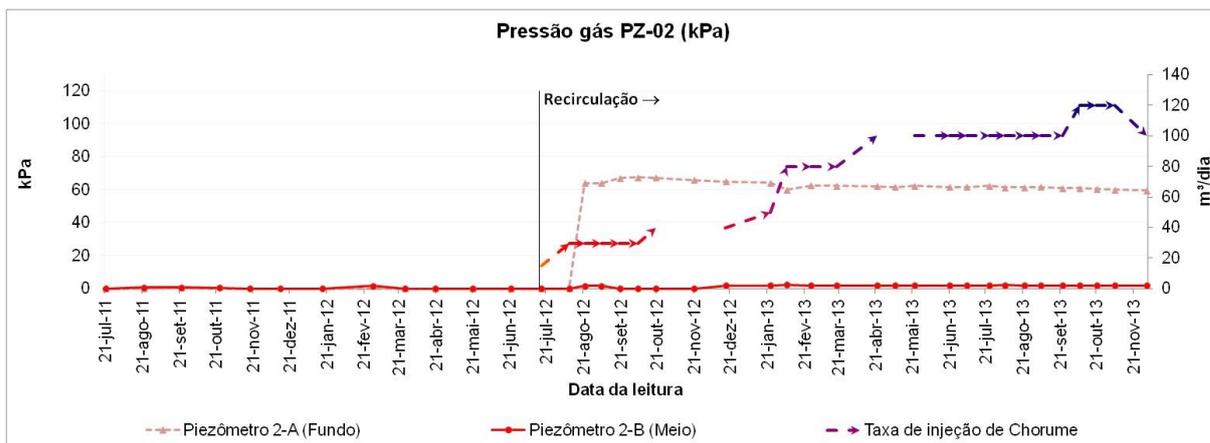


Figura 6-16 – Pressão Biogás PZ-02.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

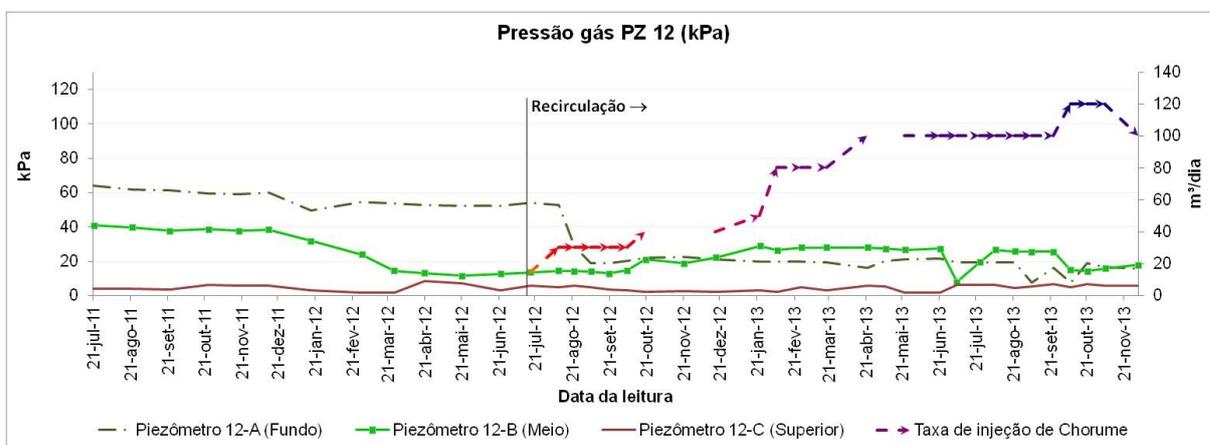


Figura 6-17 – Pressão Biogás PZ-12.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

6.5. Análise global da produção de metano.

A Figura 6-18 apresenta um gráfico relacionando a massa de RSU disposta em todo aterro com os volumes de produção de metano e a Figura 6-19 apresenta um gráfico contemplando a vazão média de biogás em todo aterro, bem como sua composição média.

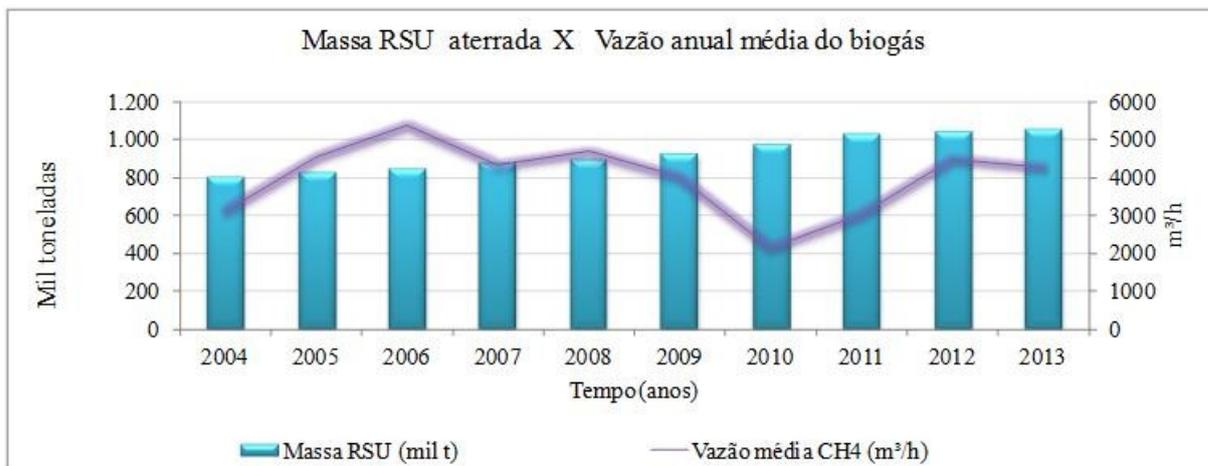


Figura 6-18 – Relação massa de RSU aterrada e vazão média do biogás gerado em todo aterro.

Fonte: Dados de Campo - a Autora.

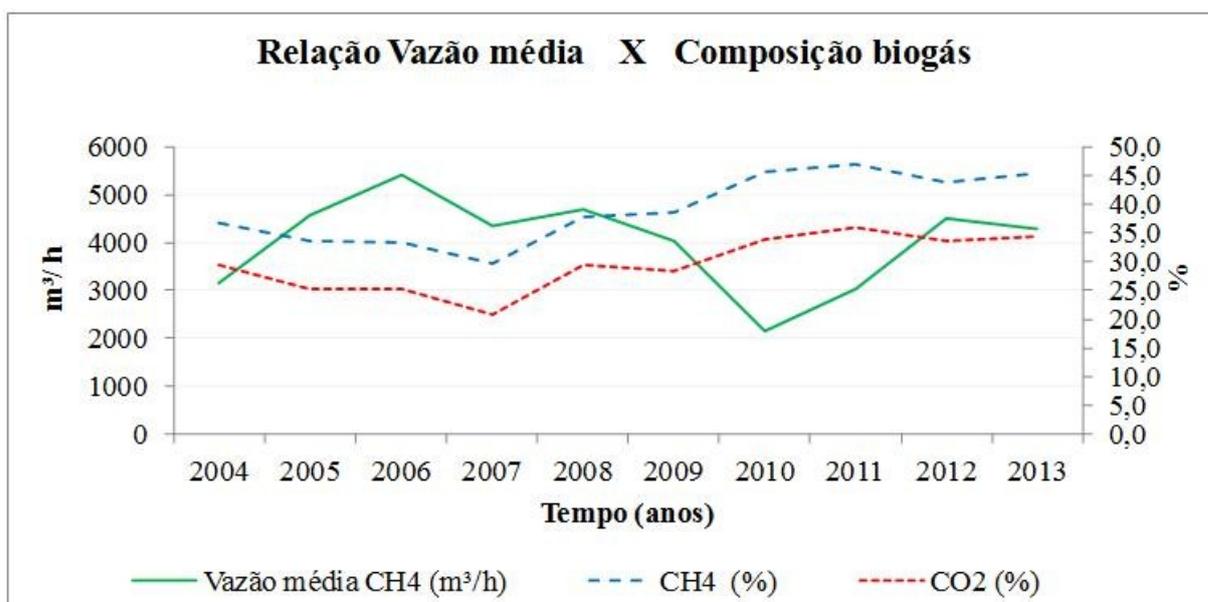


Figura 6-19 – Relação vazão média biogás X composição do biogás.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

Com base nas Figuras 6-18 e 6-19 observa-se que entre os anos de 2006 e 2007 aconteceu uma queda acentuada na vazão de CH₄. Segundo Machado *et al.* (2009), mudanças na sistemática de operação envolvendo a disposição dos resíduos novos sobre os RSU aterrados a cerca de um ano contribuíram significativamente para a queda. Esta prática altera significativamente o ambiente de decomposição estabelecido no interior do maciço, cujas arqueas metanogênicas já estabelecidas passam a sofrer com a influência das bactérias acidogênicas.

Apesar da recuperação dos níveis de produção do biogás em 2007 e 2008, em 2009 se iniciou uma nova fase de decadência na geração de CH_4 . Acredita-se que estes eventos estejam relacionados com alterações nas sistemáticas de operação do aterro, tais como a não cobertura diária dos RSU que contribui para o aumento de duração da fase aeróbia devido à aeração constante do ambiente interno das células, provocando lixiviação de nutrientes e de microrganismos essenciais à fase metanogênica. Neste mesmo período também acontecia a construção e pré-operação da Termoverde, que necessitava de manobras para sucção do biogás a exemplo da interrupção de alguns e instalação de novos sopradores e regularização de células com a disposição de novos RSU.

Em 2012, os volumes de produção de metano foram retomados em função da introdução de novas frentes de operação e mudanças nas sistemáticas de compactação dos RSU cujo objetivo era aumentar a densidade alcançada visando uma maior produção de biogás por unidade de volume.

A Figura 6-20 apresenta um gráfico contemplando a diferença existente entre a vazão de metano gerada e a vazão de metano prevista, desmembrada pela contribuição de cada célula do ASMC. Com base na Figura observa-se que a Macrocélula obteve melhor resultado, uma vez que os volumes de produção de metano mantiveram-se bem próximos dos volumes previstos. As divergências acentuadas nas demais células do aterro estão relacionadas com problemas operacionais e/ou alterações na rotina operacional de cada célula.

Observa-se que as maiores discrepâncias estão relacionadas com a Célula 6. Acredita-se que essas divergências nas células 5 e 6 foram fortemente impactadas pelas alterações de operação já explicitadas, uma vez que a curva teórica (prevista) foi desenhada com base no modelo de decaimento de primeira ordem não contemplando estas alterações. Nota-se também que tais diferenças tendem a diminuir com o tempo (Célula 5 como exemplo) em função do avanço das fases de decomposição dos RSU aterrados.

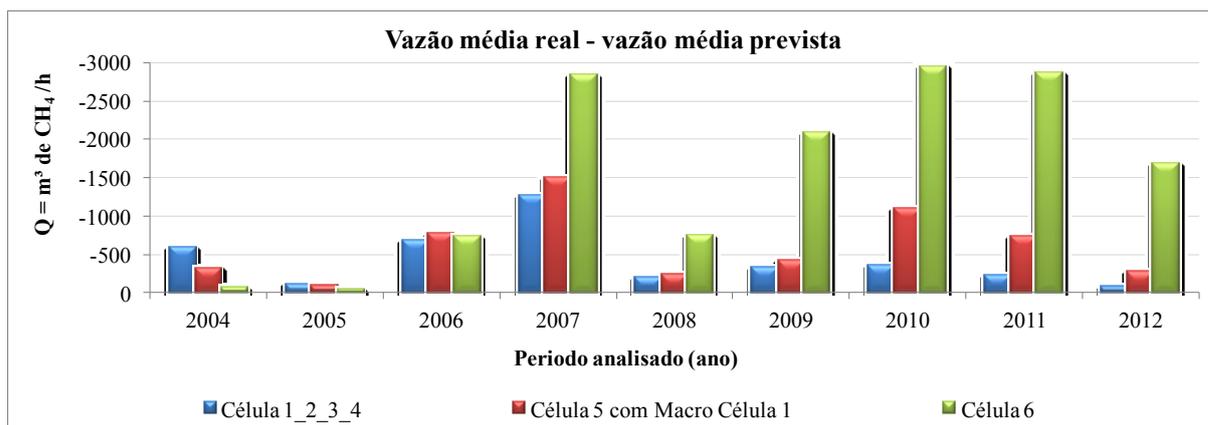


Figura 6-20 – Diferença entre vazão de metano medida e a prevista.

Fonte: Dados de Campo - a Autora.

Ao voltar à atenção especificamente para a Macro célula (Figura 6-21) observa-se que a vazão de biogás medida foi próxima a curva teórica prevista e não foram observadas alterações significativas no comportamento da produção de biogás após a aplicação da técnica de recirculação do chorume.

Considerando que a recirculação foi implantada após os RSU já estarem em elevada fase de decomposição, ou seja, com potencial de geração de CH₄ remanescente quase que insignificante. Porém com o advento da recirculação, a vazão de CH₄ manteve uma estabilização, ficando bem próximo da vazão prevista, o que é extremamente positivo, pois tal comportamento pode estar relacionado com uma extensão da fase de produção de biogás.

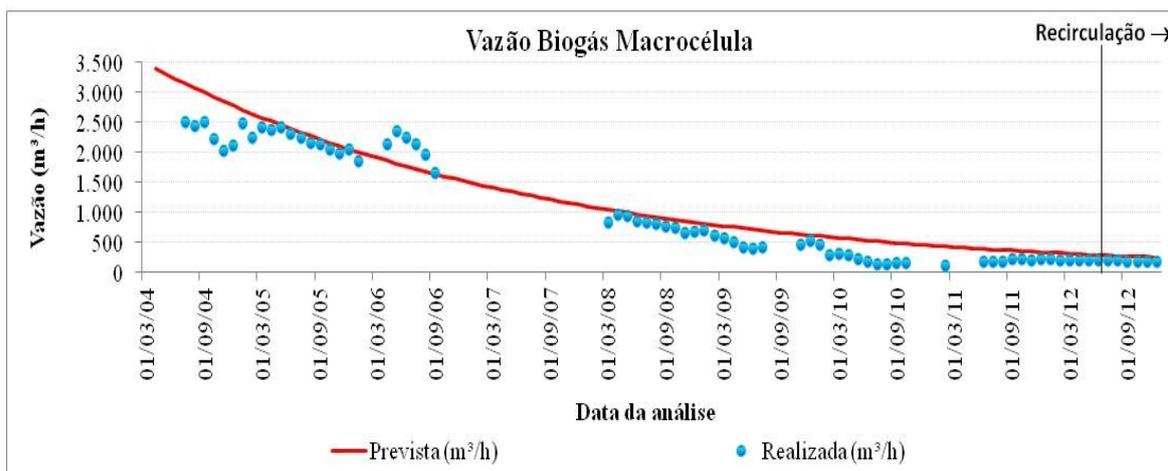


Figura 6-21 – Produção de biogás na macro célula ao longo dos anos.

Fonte: Dados de Campo - a Autora.

Além do acompanhamento da produção global de gás na Macro célula, optou-se em acompanhar o comportamento individual de 27 drenos espinhas (DE) instalados. As Figuras 6-22 a 6-26 apresentam a evolução da geração de biogás dos DE-008, DE-013, DE-102, DE-143 e DE-159 respectivamente.

Através das Figuras também é possível acompanhar a evolução da composição do biogás e as variações da taxa de injeção de chorume na macro célula ao longo do período analisado. Composição do gás de aterro é um indicador muito significativo que denota tanto o percentual de metano, quanto de dióxido de carbono presentes no biogás, de forma a permitir uma melhor operação da Termoverde, uma vez que o metano é o principal agente a ser relacionado diretamente com a geração de energia nesta usina.

Destaca-se que dos 27 drenos selecionados, estes são os que apresentaram as maiores vazões de biogás na Macro célula. Não foi possível perceber melhoria significativa do volume de produção de biogás com a recirculação de chorume no aterro, porém é nítida a intensificação das oscilações das vazões após a recirculação, principalmente nos DE-013 e DE-143.

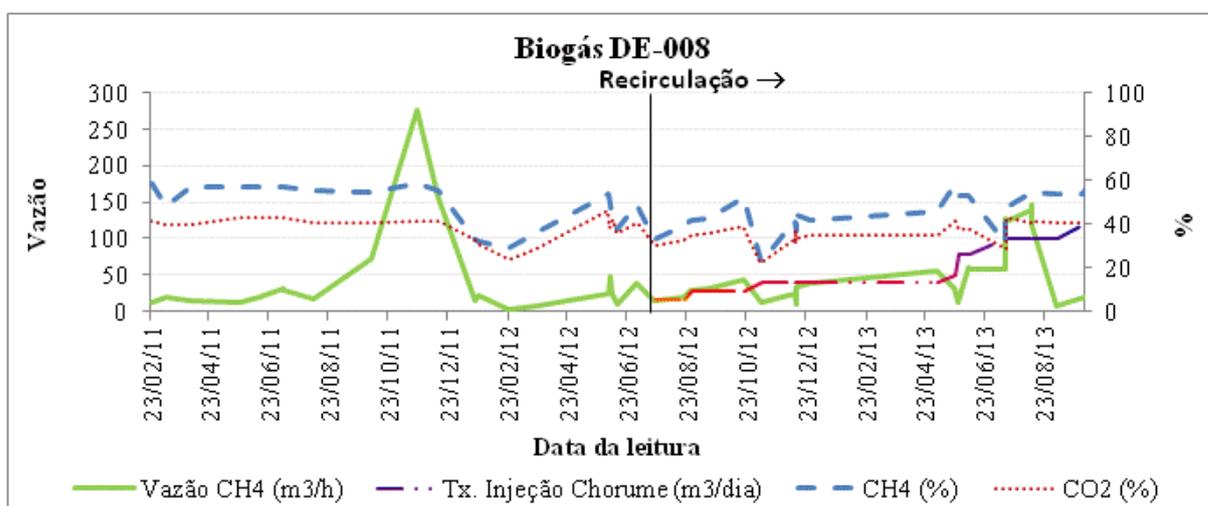


Figura 6-22- Produção de biogás DE-008.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

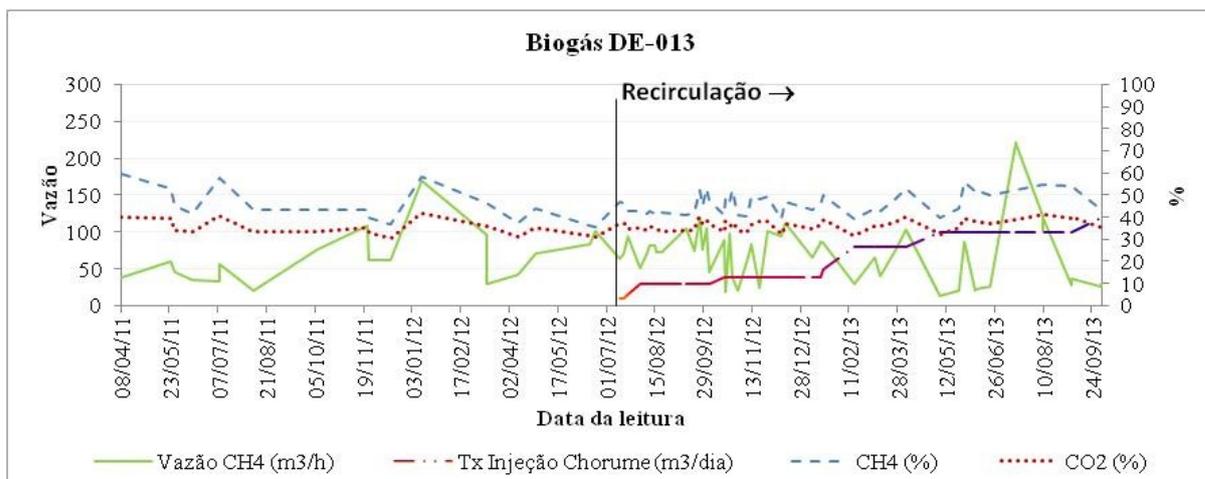


Figura 6-23- Produção de biogás DE-013.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

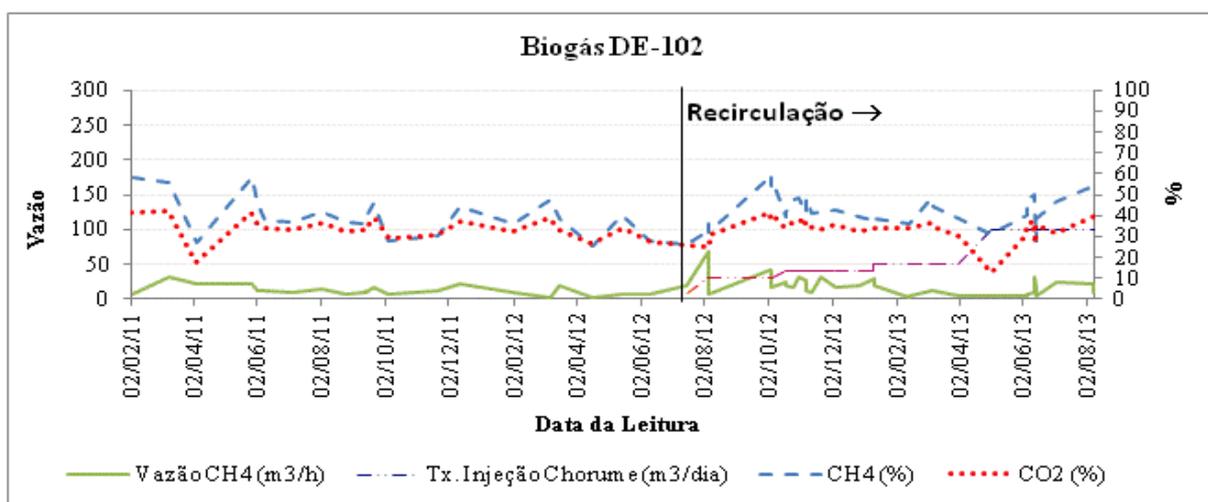


Figura 6-24- Produção de biogás DE-102.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

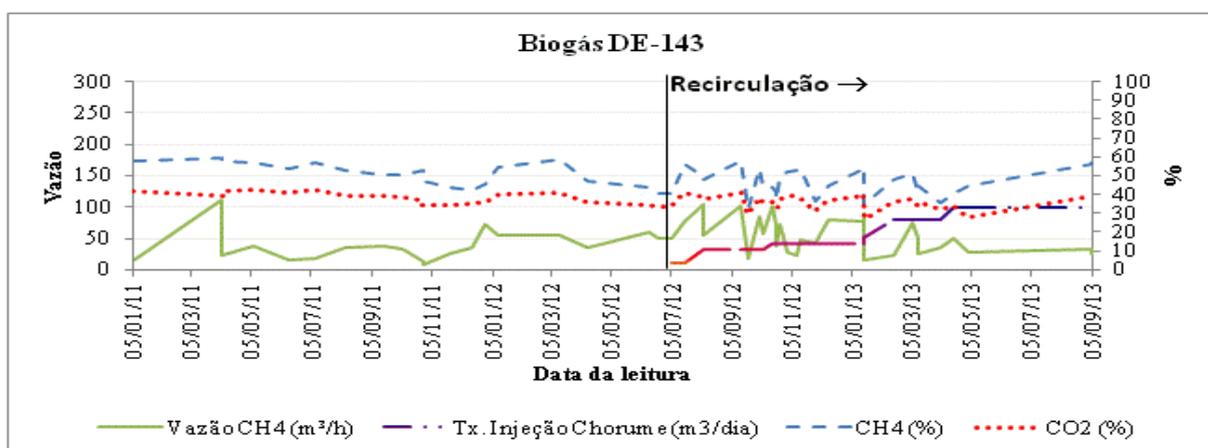


Figura 6-25- Produção de biogás DE-143.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

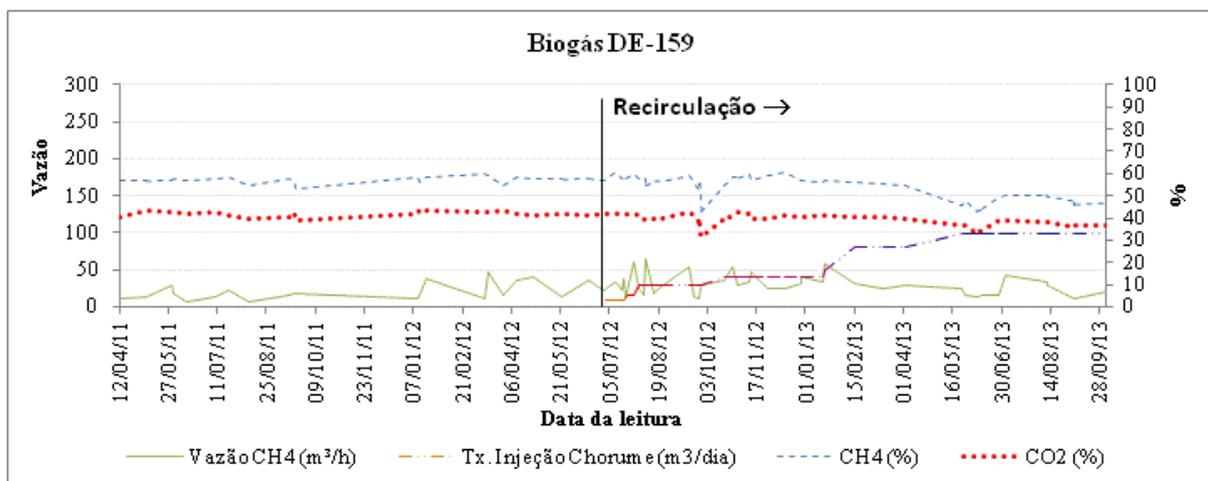


Figura 6-26- Produção de biogás DE-159. Fonte:

Dados de Campo - a Autora.

As Figuras 6-27 a 6-30 apresentam a evolução da geração de biogás dos DE-012, DE-103, DE-105 e DE-210 respectivamente. Não é possível constatar a influência da recirculação nos valores de vazão desses drenos, os quais permaneceram com características dos estágios finais de decomposição microbológica do RSU, com baixa produção de biogás.

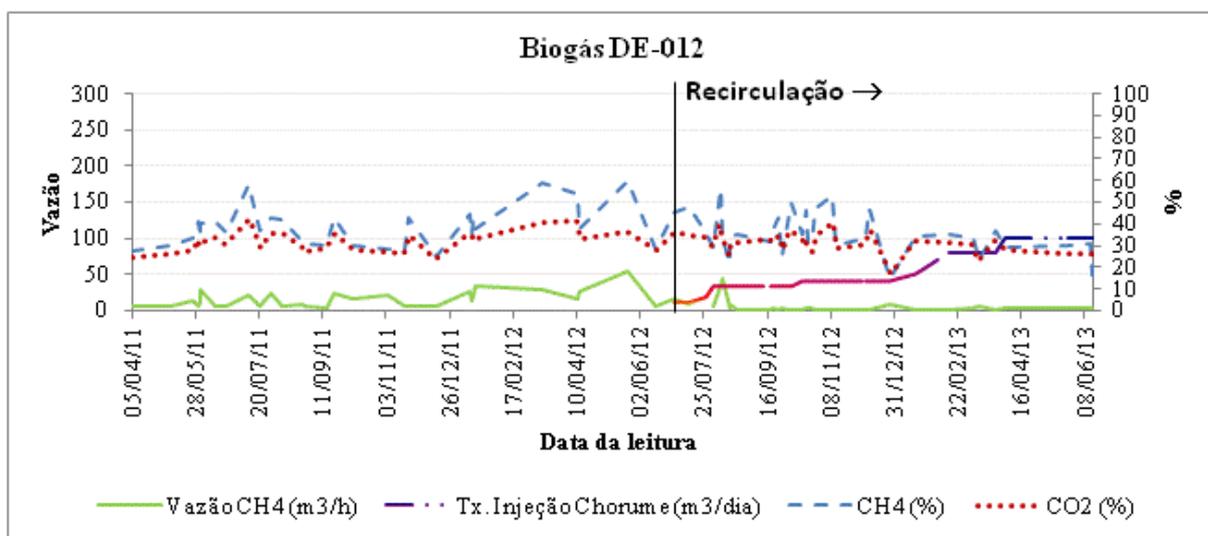


Figura 6-27- Produção de biogás DE-012.

Fonte: Dados de Campo - a Autora.

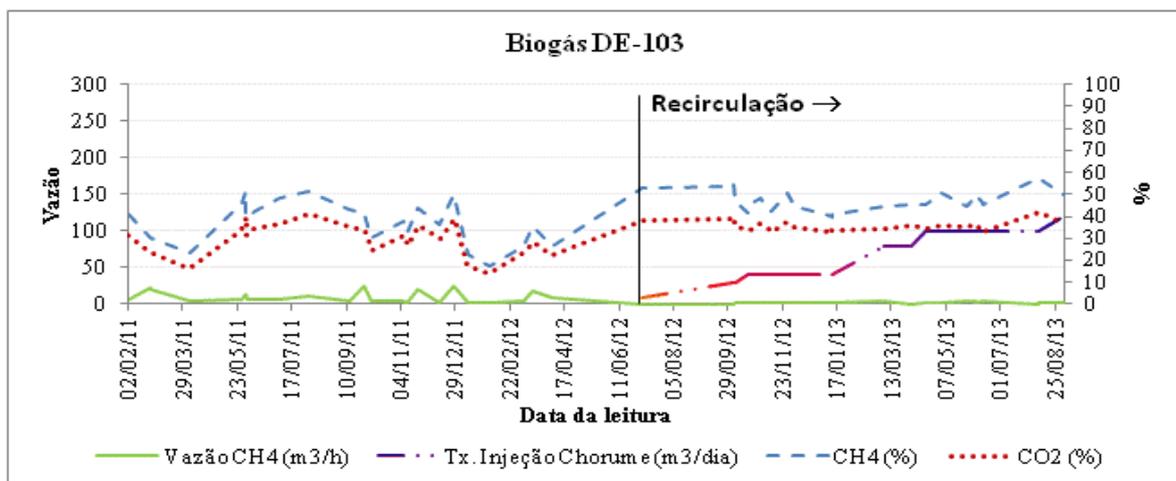


Figura 6-28- Produção de biogás DE-103.

Fonte: Dados de Campo - a Autora.

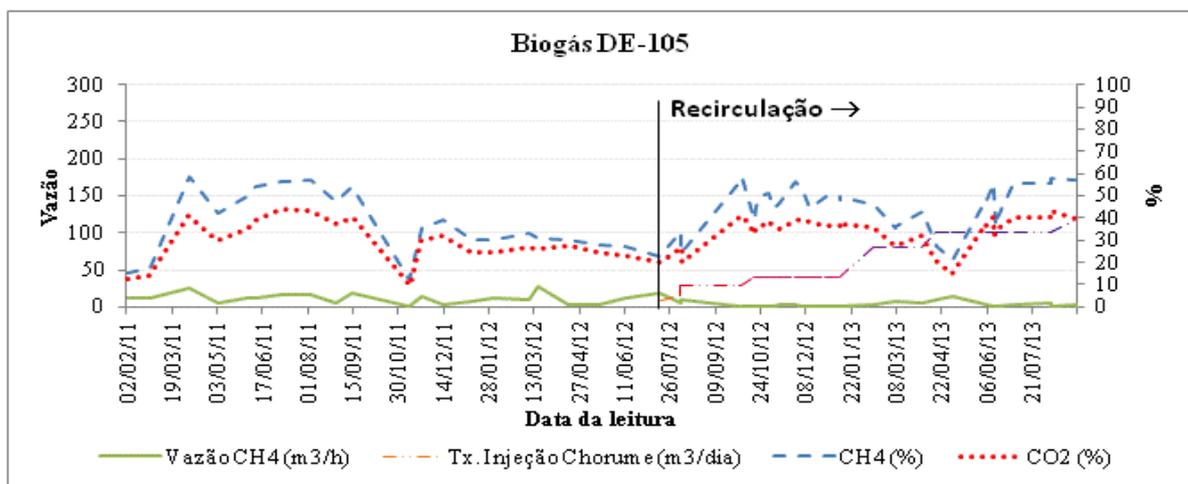


Figura 6-29- Produção de biogás DE-105.

Fonte: Dados de Campo - a Autora.

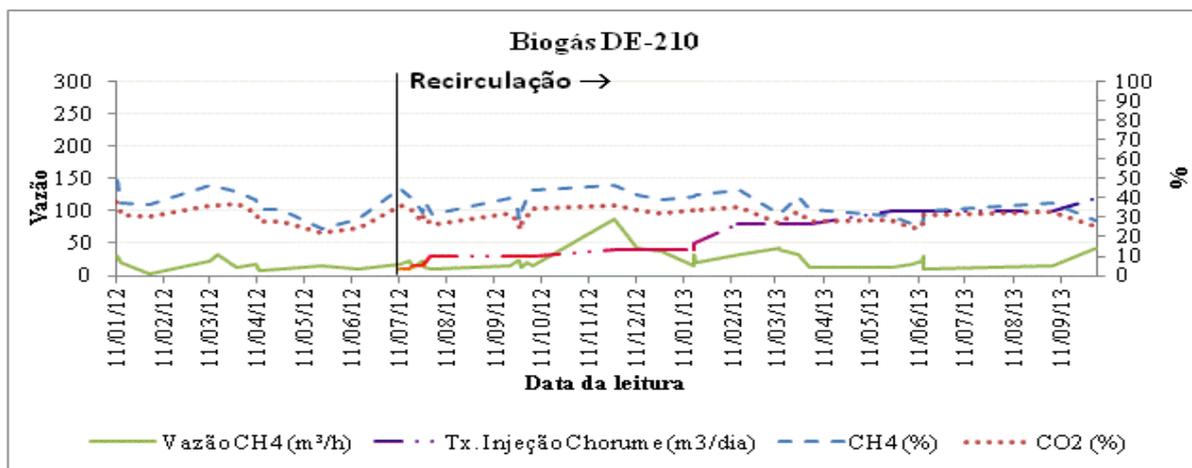


Figura 6-30- Produção de biogás DE-210.

Fonte: Dados de Campo - a Autora.

De uma maneira geral o comportamento dos drenos acima listados é diferente dos apresentados por Manzur (2010) e Baraldi (2003). Na pesquisa apresentada por Baraldi (2003) a autora acredita que a recirculação do chorume pode ter acelerado a fase metanogênica na célula com RSU com idade média de dois anos de aterramento contribuindo assim para a alteração na composição do biogás e elevação do percentual de metano em camadas profundas da célula (em torno de 60%).

Já Manzur (2010) apresenta evidências da influência direta da recirculação do chorume com o volume e a composição do biogás. Segundo o autor a percentagem do metano e a taxa de degradação do RSU aumentam com a elevação da taxa de recirculação do chorume, saindo da faixa dos 45% para algo em torno dos 55%.

Acredita-se que tal divergência entre resultados alcançados no ASMC e nos demais experimentos comparados, estejam relacionadas diretamente com a idade de aterramento dos RSU. Considerando que os RSU do ASMC são mais maduros (tempo superior de aterramento) estes já estariam em estágios avançados de degradação, com baixa fração orgânica, o que culminaria num menor volume de produção de biogás.

Todavia, tomando como base a composição típica das principais espécies gasosas presentes no RSU e suas variáveis apresentada por Tchobanoglous *et al* (1994) observa-se que a composição do biogás do ASMC está dentro dos padrões esperados, cujos percentuais típicos são de 45% a 70% para o metano e 40% a 60% para o dióxido de carbono.

6.6. Monitoramento geotécnico - Recalques.

A fim de estabelecer um marco inicial para acompanhamento efetivo dos dados geotécnicos, bem como possibilitar uma análise comparativa entre o período antecedente à recirculação do chorume e o período com a aplicação da técnica optou-se em trabalhar com o horizonte de aproximadamente um ano antes da implantação do sistema de recirculação de chorume.

Assim, são apresentados os dados obtidos através do monitoramento realizado em 20 marcos superficiais (MS) durante o período de 24 de agosto de 2011 a 28 de novembro de 2013.

Para facilitar a interpretação dos dados de campo estruturou-se grupos de análises seguindo

os mesmo alinhamentos existentes em campo:

- Grupo 1: MS-01, MS-02 e MS-04;
- Grupo 2: MS-07, MS-09 e MS-10
- Grupo 3: MS-14, MS-15, MS-16 e MS-17;
- Grupo 4: MS-20, MS-21 e MS-22;
- Grupo 5: MS-23, MS-24 e MS-25;
- Grupo 6: MS-26, MS-27, MS-28 e MS-29.

A Figura 6-31 apresenta a localização dos marcos superficiais separados em grupos.



Figura 6-31 – Divisão da macrocélula em 6 grupos de acompanhamento – marcação dos marcos superficiais.

Fonte: A autora.

- Grupo 1.

As Figuras 6-32 a 6-34 apresentam os recalques parciais, as velocidades médias de recalque e os valores de recalque acumulado, respectivamente, para os marcos MS-01, MS-02 e MS-04.

Os comportamentos expressos nas Figuras 6-32 e 6-33 sugerem que os RSU dispostos nestas zonas da macrocélula já estavam na fase de estabilização e que com o início da recirculação do chorume as movimentações verticais voltaram a acontecer, com destaque para o MS-04 que registrou uma velocidade média de recalque de 1,1 mm/dia e recalque acumulado de 35,23 cm. Os marcos MS-01 e MS-02 apresentaram menores deslocamentos comparativamente ao marco MS-04.

Ambos comportamentos estão de acordo com o esperado, uma vez que o MS-04 está localizado na zona com resíduos mais recentes e os MS-01 e MS-02 na zona onde se encontra disposto o resíduo mais antigo da célula. Além disso, a coluna de RSU é maior no caso do MS-04.

Nota-se também uma lacuna nas medições de recalque referente ao MS-04 no período de dezembro de 2011 a junho de 2012. Tal acontecimento está relacionado com a perda e necessidade de relocação do MS-04 em função de intercorrências operacionais.

Através da Figura 6-33 fica nítida a influência da aplicação da técnica sobre os deslocamentos verticais. Observa-se também que os maiores impactos no recalque ocorreram a partir do momento em que a taxa de injeção atingiu os 50m³/dia, todavia ao atingir os 100m³/dia houve uma nova estabilização dos valores de recalque.

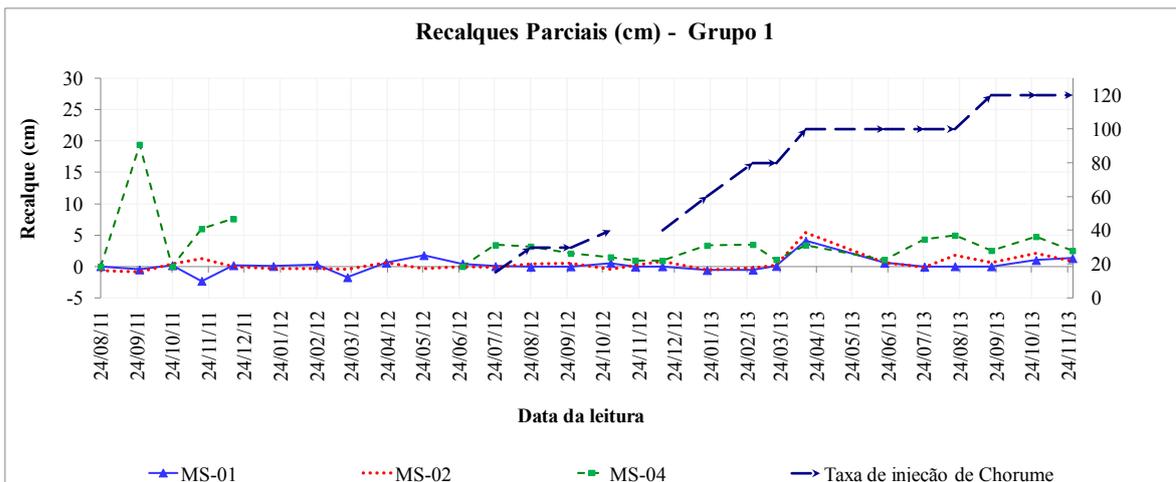


Figura 6-32 – Evolução recalques parciais - marcos superficiais grupo 1.

Fonte: Dados de Campo - a Autora.

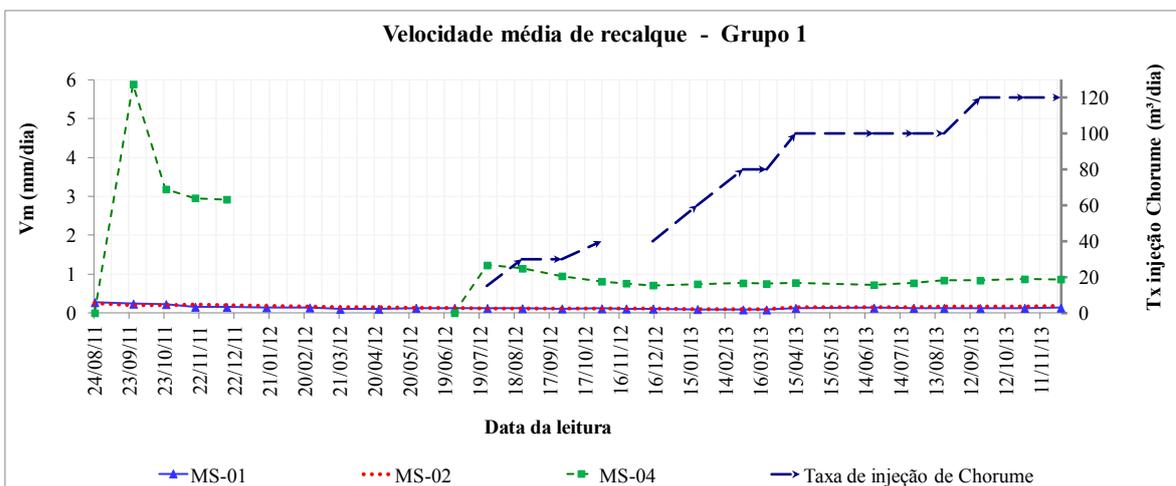


Figura 6-33 – Evolução das velocidades médias de recalque - marcos superficiais grupo 1.

Fonte: Dados de Campo - a Autora.

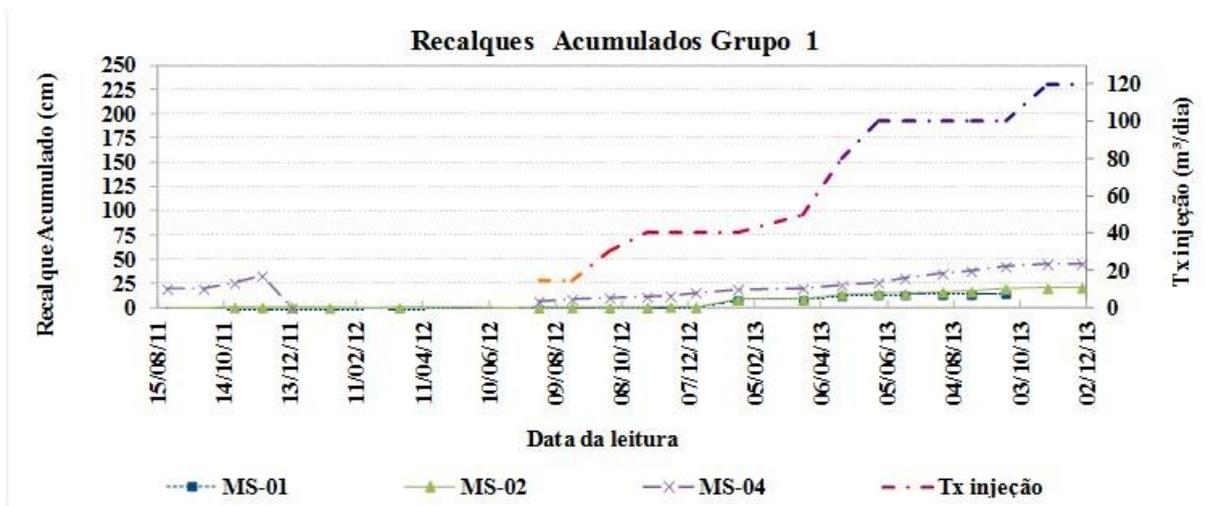


Figura 6-34 – Evolução dos recalques acumulados - marcos superficiais grupo 1.

Fonte: Dados de Campo - a Autora.

- Grupo 2.

Com base nas Figuras 6-35 a 6-37 observa-se que a zona onde estão instalados os marcos do grupo 2 encontrava-se menos ativa comparativamente aos marcos do grupo 1. São observados comportamentos atípicos no período de outubro de 2011 a janeiro de 2012 (antes da recirculação), com o aumento da cota do terreno (expansões). Este comportamento se repetiu no período em que a recirculação já estava ativa.

Não foi localizado registro de atividades que possam ter interferido diretamente na movimentação dos MS do grupo 2, todavia acredita-se que as expansões registradas ao longo do ciclo analisado possam estar relacionadas a implementação do sistema de cobertura de áreas do aterro, redução das emissões fugitivas e a ocorrência de chuvas, que poderiam provocar o aumento das pressões internas no aterro, embora os piezômetros instalados nesta zona não tenha detectado aumentos significativos. Como o maciço de RSU é bastante heterogêneo uma mesma atividade pode provocar reflexos distintos no maciço, em função das suas condições locais de drenagem e impermeabilização, por exemplo.

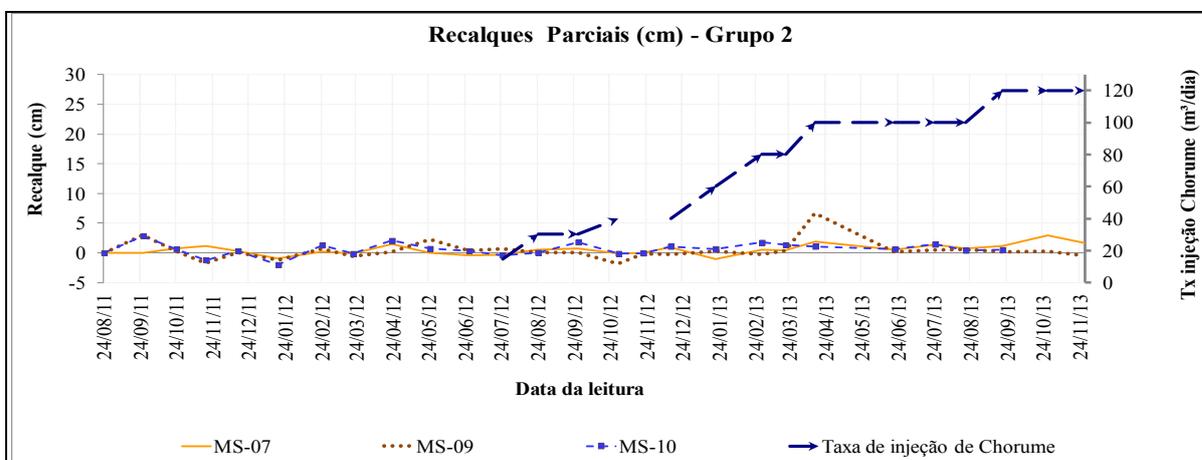


Figura 6-35 – Evolução recalques parciais - marcos superficiais grupo 2.

Fonte: Dados de Campo - a Autora.

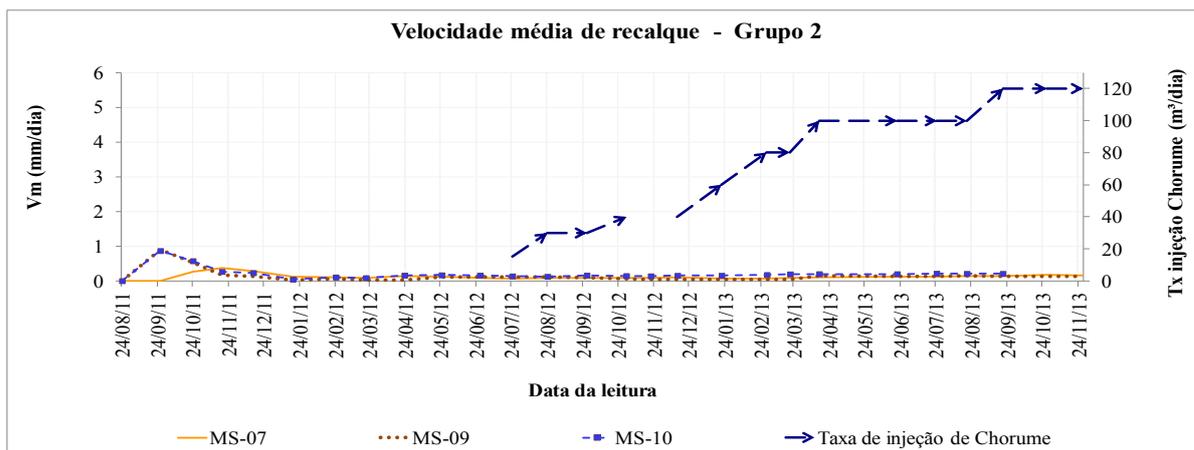


Figura 6-36 – Evolução das velocidades médias de recalque - marcos superficiais grupo 2.

Fonte: Dados de Campo - a Autora.

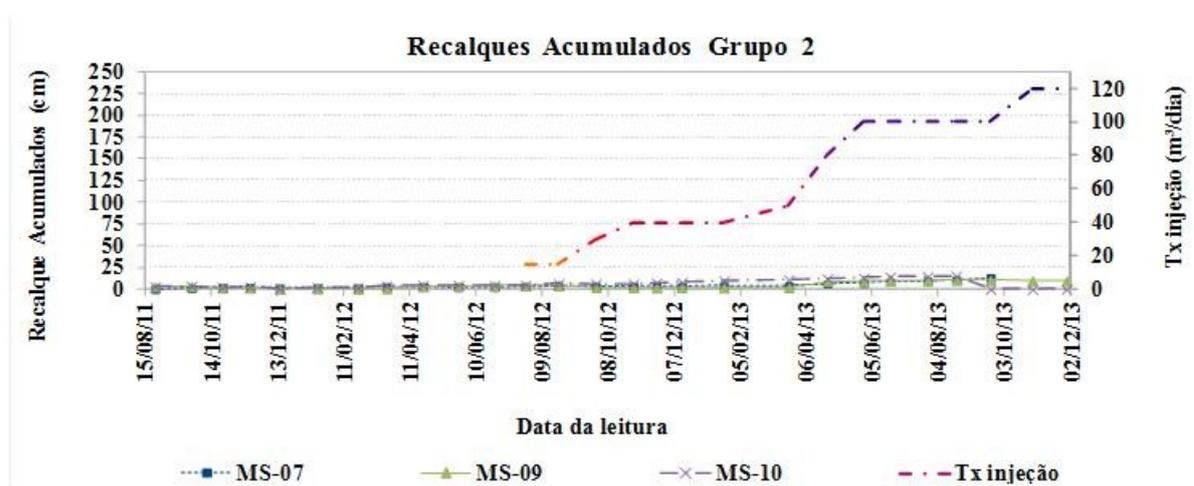


Figura 6-37 – Evolução dos recalques acumulados - marcos superficiais grupo 2.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

- Grupo 3.

Com base nas Figuras 6-38 e 6-39 é possível observar que no período antecedente a recirculação do chorume havia uma tendência de acomodação do maciço na zona onde se encontram instalados os MS-14, MS-15 e MS-16; diferentemente do observado na região do MS-17 que registrava movimentações mais intensas quando comparado com os demais marcos do grupo 1, grupo 2 e grupo 3.

Tal comportamento é condizente com as idades de aterramento dos RSU, uma vez que os MS-14, MS-15 e MS-16 estão instalados na área com resíduos antigos e o MS-17 em área com resíduos recentes. Como os recalques estão diretamente ligados com a carga orgânica do RSU

aterrado e o tempo de aterramento, é natural que haja movimentações irregulares durante o processo de biodecomposição.

Com a aplicação da técnica de recirculação do chorume alterações de baixa intensidade foram registradas nas movimentações dos MS-14, MS-15 e MS-16, conforme pode ser vista com maior detalhamento na Figura 6-40. Através dela é também possível observar que o MS-17 apresentou recalque acumulado de 183,71 cm, muito acima dos demais MS acompanhados.

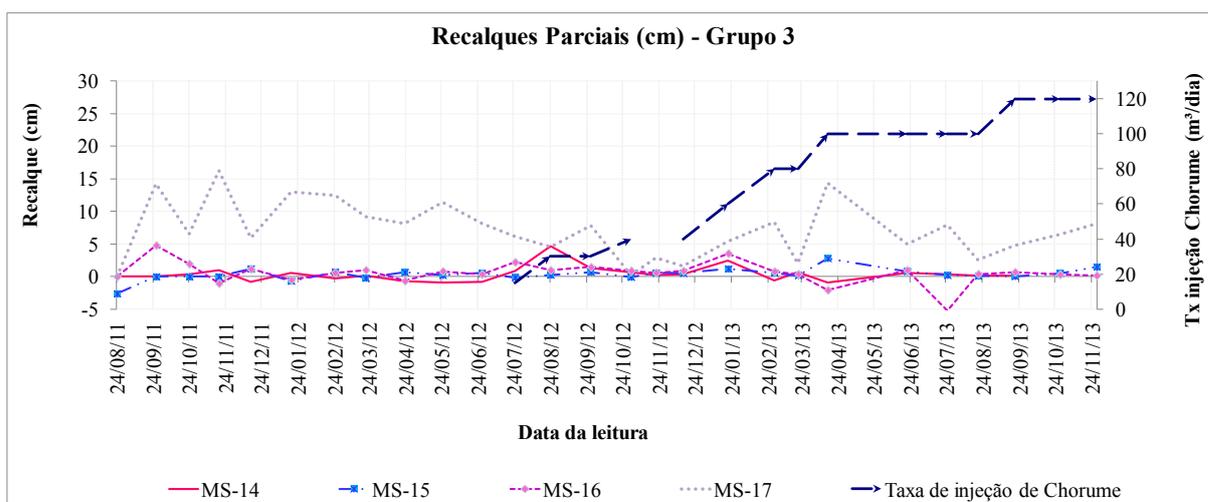


Figura 6-38 – Evolução recalques parciais - marcos superficiais grupo 3.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

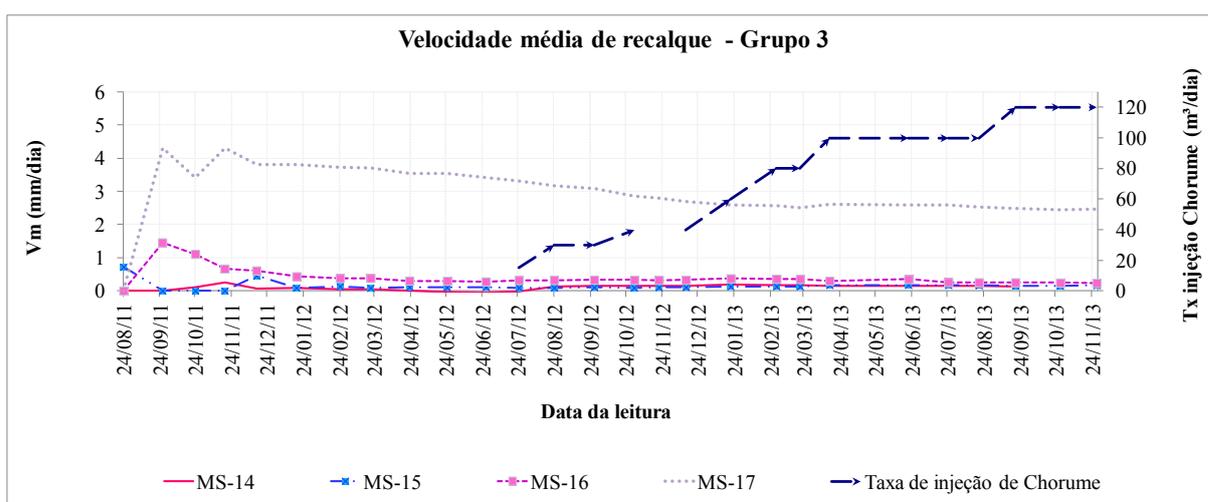


Figura 6-39 – Evolução das velocidades médias de recalque - marcos superficiais grupo 3.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

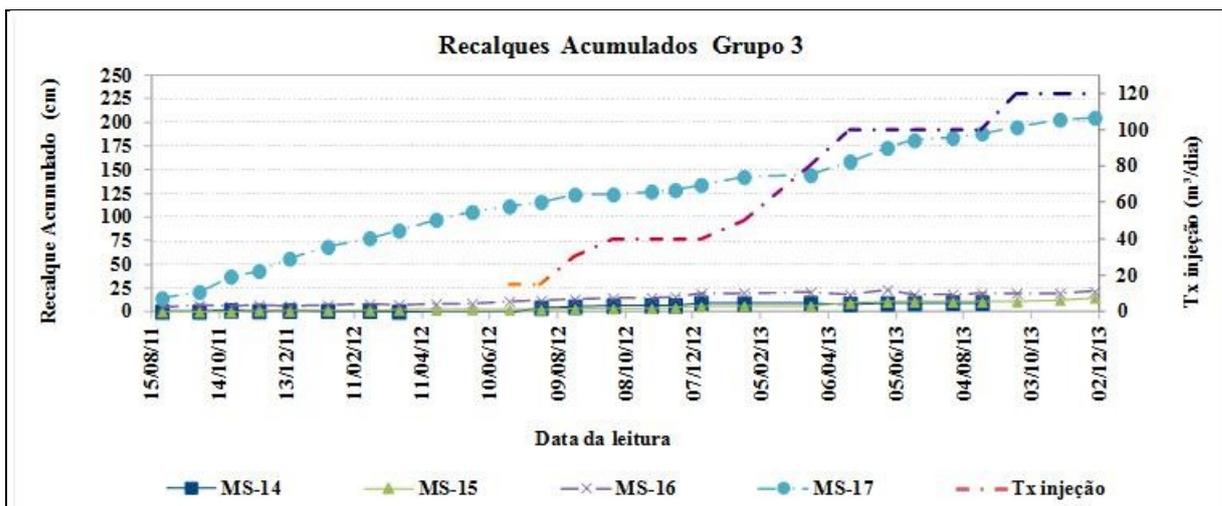


Figura 6-40 – Evolução dos recalques acumulados - marcos superficiais grupo 3.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

- Grupo 4.

As Figuras 6-41, 6-42 e 6-43 apresentam os gráficos de recalques, velocidades médias de recalque e recalques acumulados dos marcos superficiais que compõem o grupo 4. Com base nelas é possível observar que os MS-20 e MS-21 encontravam-se numa região com movimentações de baixa intensidade, todavia com velocidades médias de recalques superiores as médias registradas em grande parte dos marcos que compõe os grupos 1, 2 e 3. Percebe-se também que mesmo com o início da aplicação da técnica de recirculação de chorume os marcos não alteraram seu comportamento, sugerindo uma acomodação na região.

Com comportamento diferenciado dos demais MS do grupo, o MS-22 apresenta uma lacuna nas medições no período que antecede a recirculação devido a movimentações de terra que culminaram na suspensão das leituras, sendo reintegrado ao sistema de monitoramento após o início da aplicação contínua da técnica de recirculação de chorume (julho de 2012). Nota-se que tal MS registrou movimentações intensas, atingindo recalque acumulado de aproximadamente 100 cm e velocidade média de recalque de 2,8 mm/dia. Acredita-se que este comportamento esteja fortemente relacionado com a idade de aterramento dos RSU e intensidade das atividades de decomposição, já que os resíduos aterrados nesta região são mais recentes.

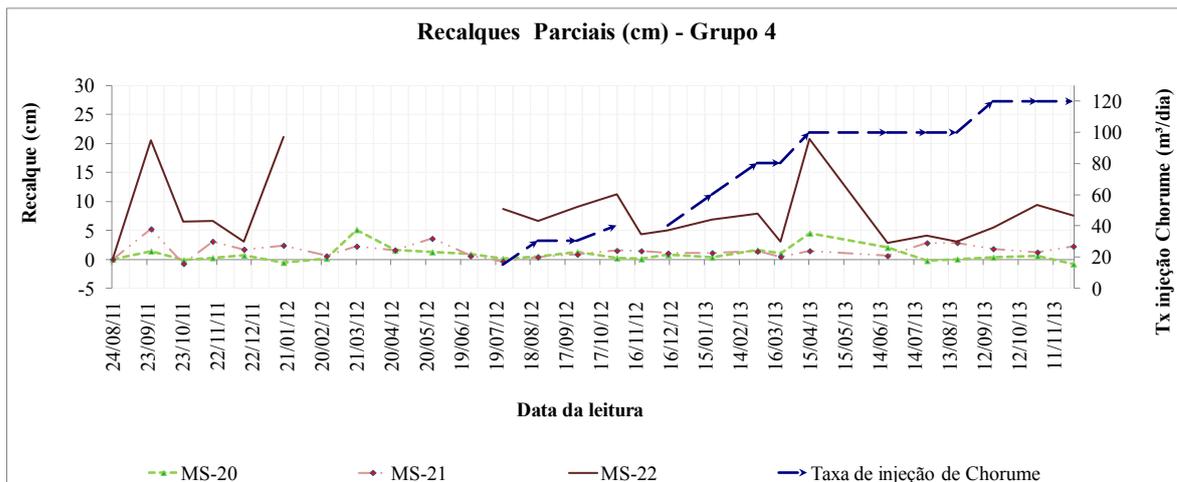


Figura 6-41 – Evolução recalques parciais - marcos superficiais grupo 4.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

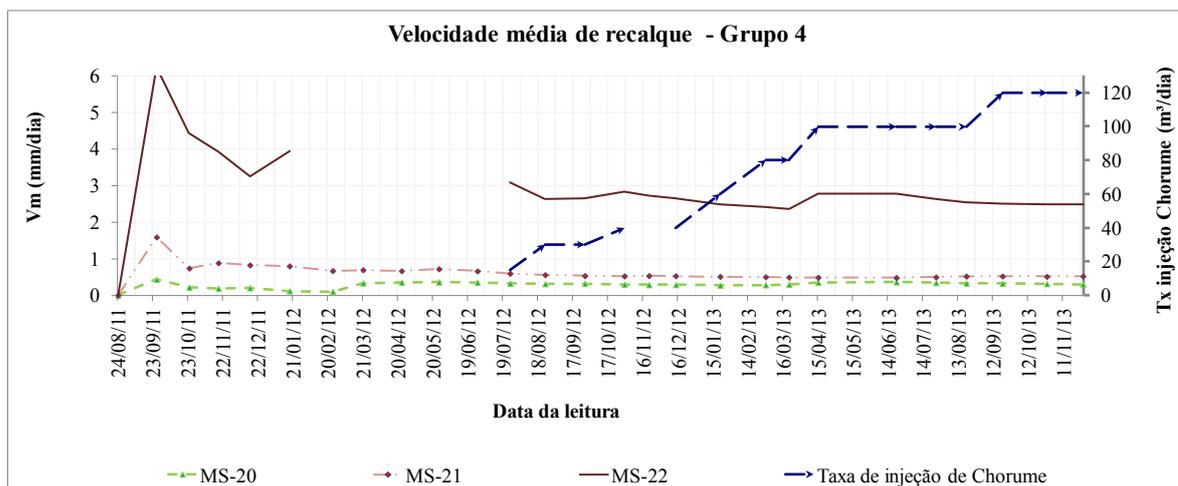


Figura 6-42 – Evolução das velocidades médias de recalque - marcos superficiais grupo 4.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

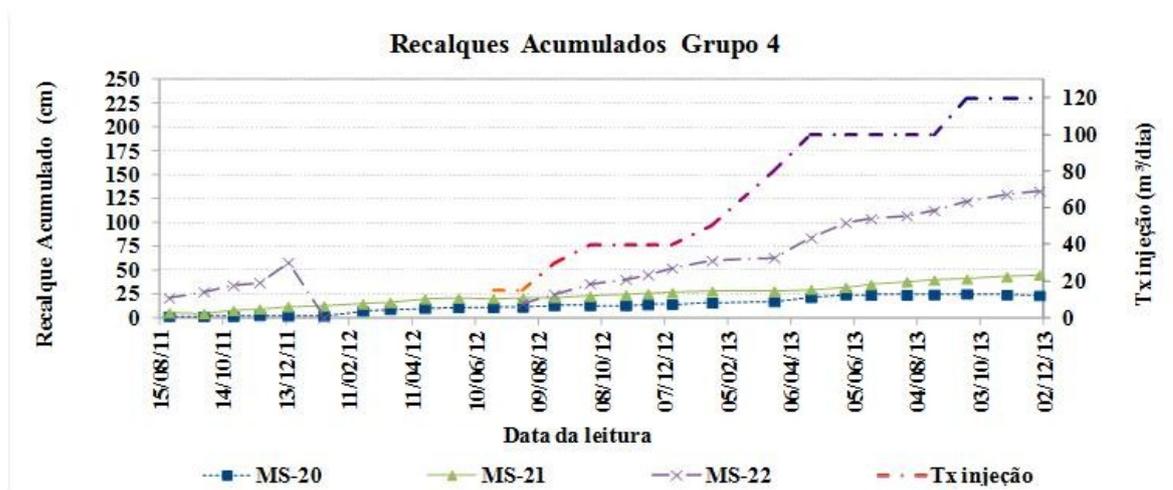


Figura 6-43 – Evolução dos recalques acumulados - marcos superficiais grupo 4.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

- Grupo 5.

As Figuras 6-44, 6-45 e 6-46 apresentam os gráficos de recalques, velocidades médias de recalque e recalques acumulados dos marcos superficiais que compõem o grupo 5 – todos em região com resíduos antigos e com influência indireta da recirculação. Com base nas Figuras observa-se uma continuidade no padrão das movimentações, sugerindo uma acomodação do maciço. A única movimentação atípica aconteceu no momento da elevação da taxa de recirculação para os 120 m³/dia, onde todos os marcos sofreram leve impacto, porém retomando seu padrão logo em seguida.

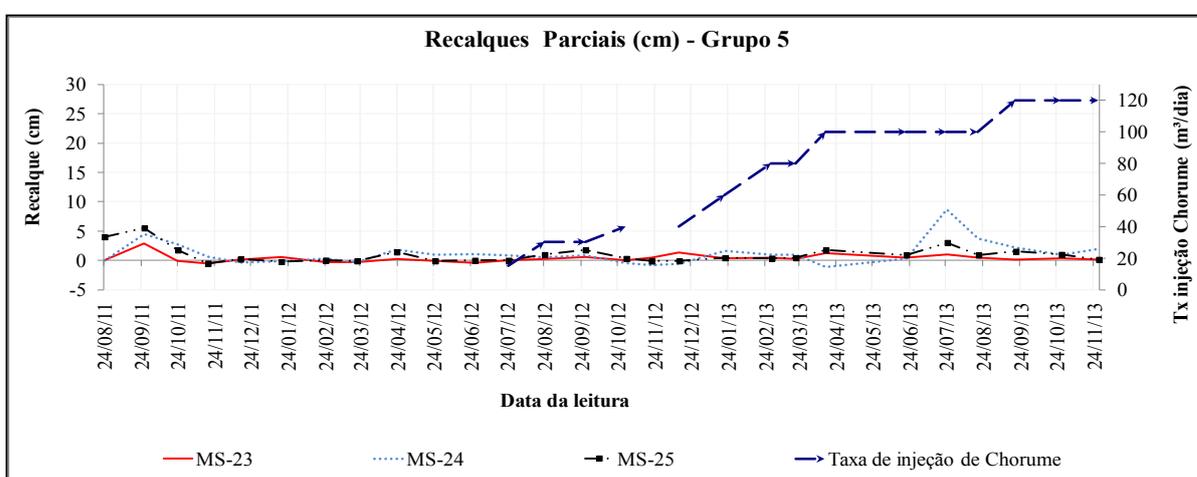


Figura 6-44 – Evolução recalques parciais - marcos superficiais grupo 5.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

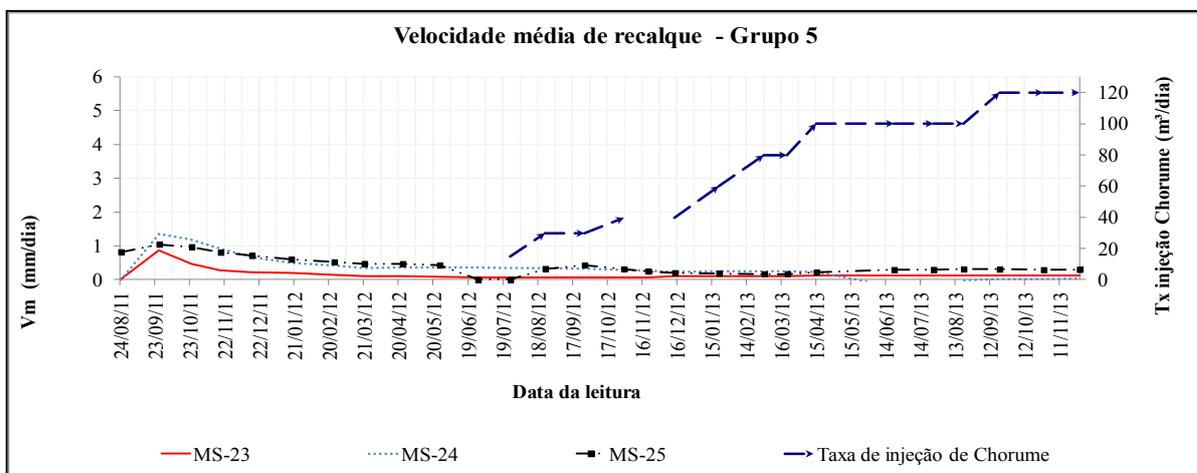


Figura 6-45 – Evolução das velocidades médias de recalque - marcos superficiais grupo 5.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

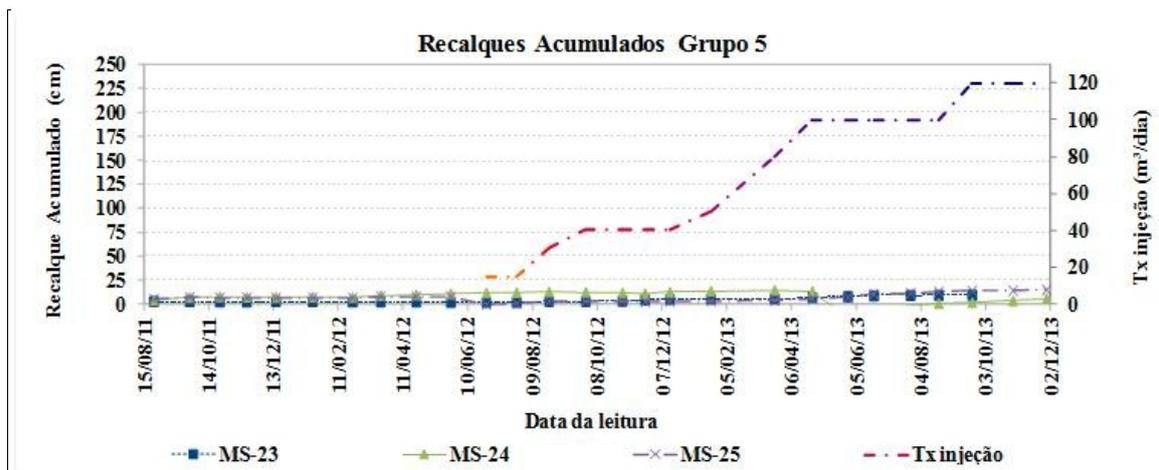


Figura 6-46 – Evolução dos recalques acumulados - marcos superficiais grupo 5.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

- Grupo 6.

As Figuras 6-47, 6-48 e 6-49 apresentam os gráficos de recalques, velocidades médias de recalque e recalques acumulados dos marcos superficiais que compõem o grupo 6. Todos os marcos do grupo (com exceção do MS-28) estão localizados em áreas cujos RSU foram classificados como resíduos antigos.

Com base nas Figuras citadas observa-se que o comportamento dos MS-26, MS-27 e MS-29 sugere um estágio avançado de decomposição das cargas orgânicas, isso pode ser traduzido pelos discretos valores de recalques e baixas velocidades médias de recalque.

O MS-28 por está instalado em área com resíduos recentes, apresentou ao longo do ciclo deformações significativas principalmente durante a recirculação do chorume, cuja velocidade média de recalque foi de 4,2 mm/dia e recalque acumulado de 227, 25 cm. Movimentação bem similar, porém com maior intensidade, aos marcos MS-17 e MS-22, que apesar de estarem em outros grupos também estão em região com resíduos recentes e localizados em cotas mais altas na Macrocélula.

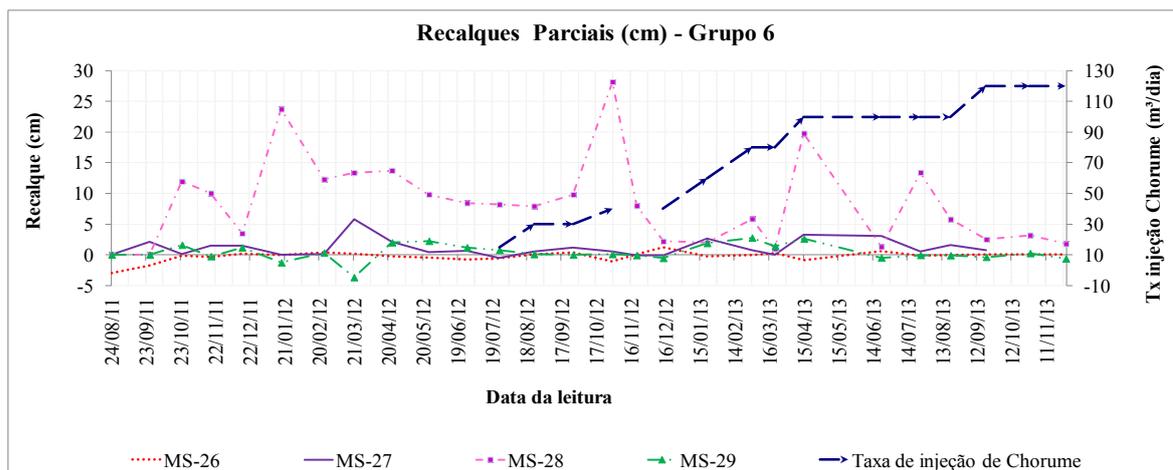


Figura 6-47 – Evolução recalques parciais - marcos superficiais grupo 6.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

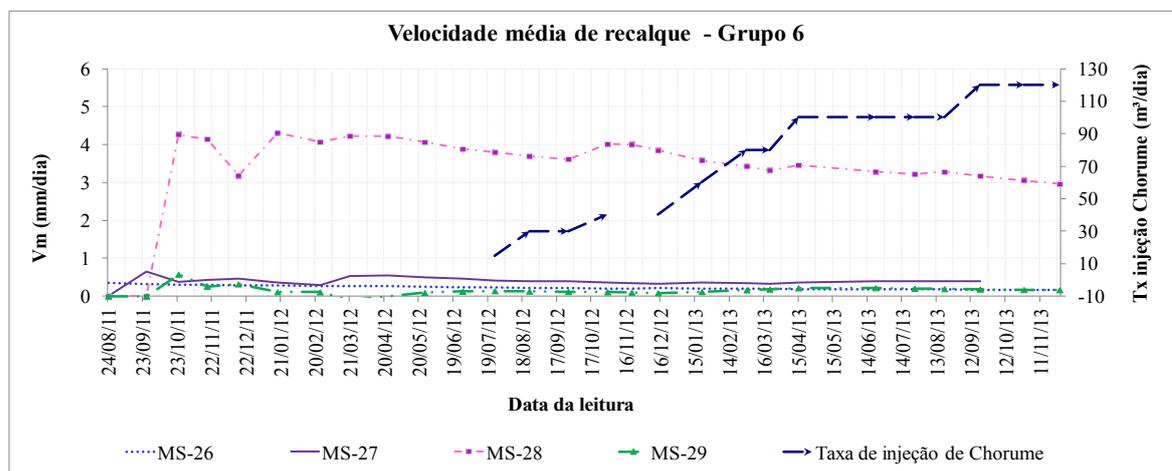


Figura 6-48 – Evolução das velocidades médias de recalque - marcos superficiais grupo 6.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

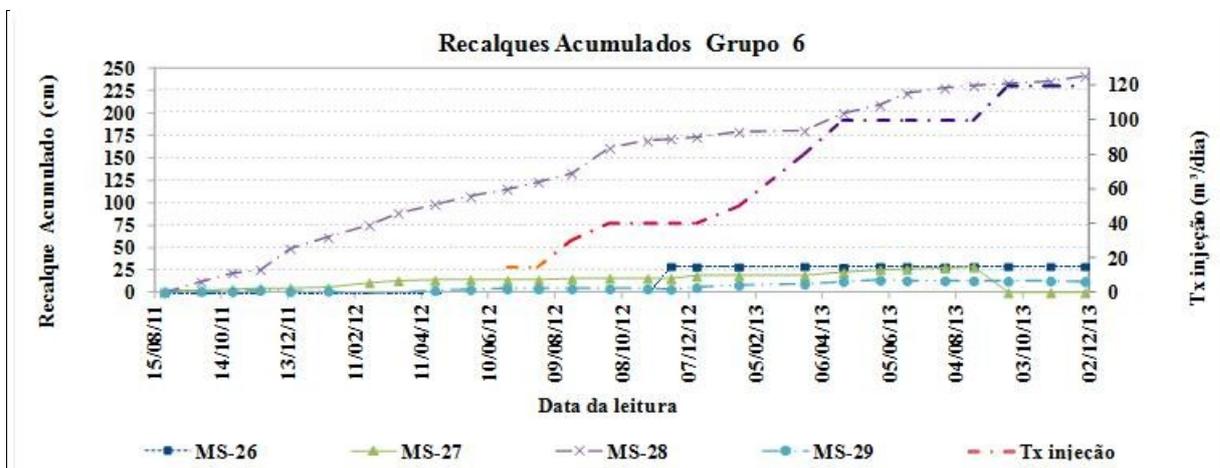


Figura 6-49 – Evolução dos recalques acumulados - marcos superficiais grupo 6.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

De um modo geral as magnitudes dos recalques acumulados registrados em todos os grupos de MS no ASMC não muito distantes dos recalques registrados durante a pesquisa reportada por Monteiro *et al* (2000), cuja pesquisa também era direcionada para o comportamento dos deslocamentos verticais nas Células 1 e 2 do Aterro da Muribeca (PE). Ambas as células possuíam RSU com idade de aterramento de aproximadamente 15 anos e operavam com aplicação da técnica de recirculação do chorume, condições similares as encontradas no ASMC.

As Figuras 6-50 a 6-52 apresentam os recalques acumulados do ASMC, recalques superficiais acumulados da célula 1 da Muribeca e recalques superficiais acumulados da célula 2 da Muribeca, respectivamente. Através delas é possível constatar que em média os recalques registrados no ASMC variaram de 10 cm a 18 cm, com exceção dos MS-17, MS-22 e MS-28. Considerando o mesmo tempo de pesquisa têm-se na Célula 1 recalques da ordem de 10cm a 20 cm. A discrepância dos valores de recalques ficaram por conta dos registrados na célula 2, onde, considerando o mesmo tempo de pesquisa, alcançaram magnitudes predominantemente superiores aos 20 cm. Todavia, para uma análise mais aprofundada desta comparação torna-se necessário uma avaliação conjunta destes parâmetros com a espessura de RSU de todas as células analisadas, o que não foi possível em função do desconhecimento da espessura de RSU das células da Muribeca..

Acredita-se que estas variações estejam relacionadas com diferenças e/ou particularidades nos procedimentos operacionais (compactação do RSU, métodos de aterramento e cobertura, procedimentos de recirculação do chorume), composição gravimétrica (vide Tabela 4-3) e climatologia (ASMC – clima de floresta tropical sem estação seca discernível e Muribeca – clima tropical do tipo “AS”).

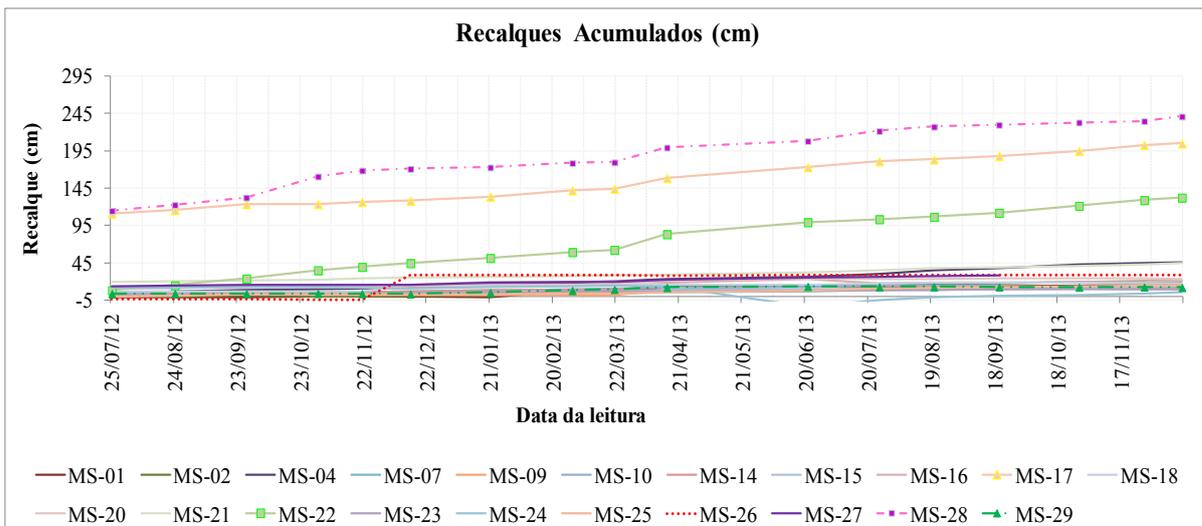


Figura 6-50 – Evolução dos recalques acumulados ASMC.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

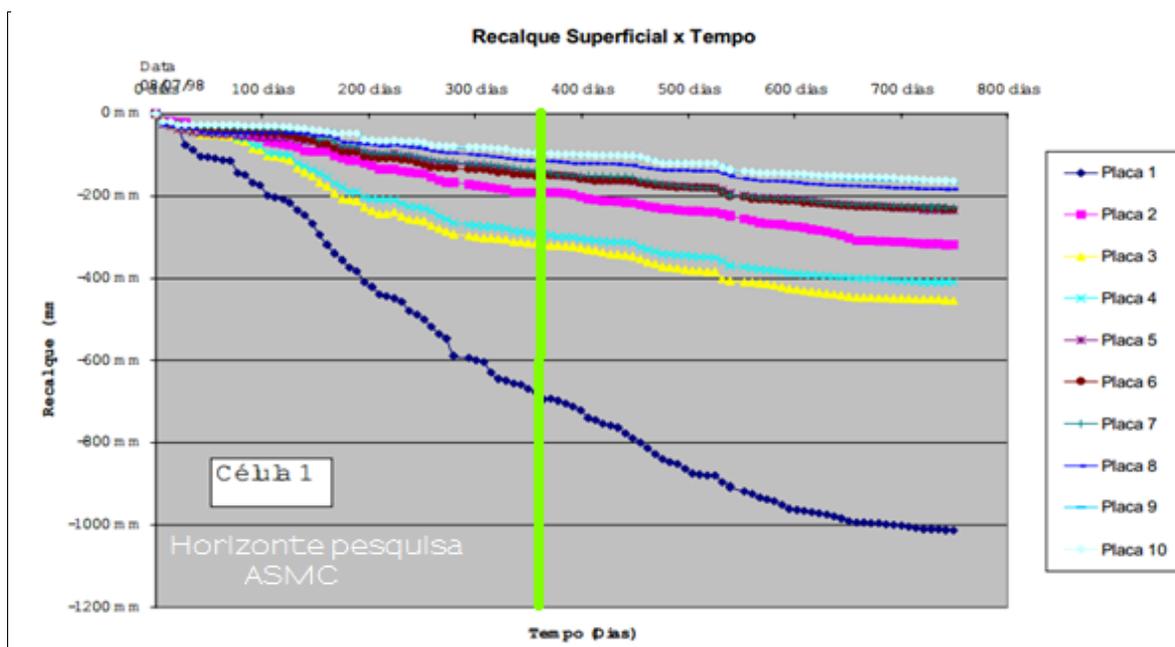


Figura 6-51 – Evolução dos recalques célula 1 - Muribeca.

Fonte: Adaptado de Monteiro *et al* (2000).

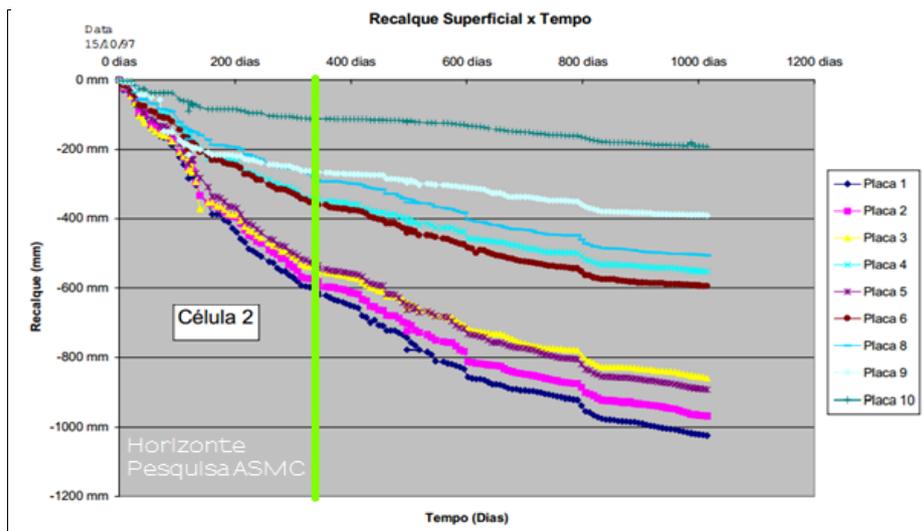


Figura 6-52 – Evolução dos recalques célula 2 - Muribeca.

Fonte: Adaptado de Monteiro *et al* (2000).

6.7. Monitoramento dos deslocamentos horizontais.

A seguir são apresentados os gráficos cujo objetivo central é permitir uma visualização da evolução dos deslocamentos horizontais parciais e acumulados em cada grupo. Através dos gráficos é possível visualizar a movimentação de todos os MS antes e durante a recirculação do chorume. Ressalva-se que os valores positivos dos deslocamentos horizontais representam o deslocamento do marco no sentido de dentro para fora do maciço (não seguro) e os valores negativos dos deslocamentos representam o deslocamento vertical no sentido de fora para dentro (seguro).

Torna-se necessário salientar que até a conclusão desta pesquisa não foram localizados estudos e/ou pesquisas relacionadas com a recirculação de chorume em células de RSU em aterros sanitários em regiões de clima tropical que fornecesse um detalhamento das informações relacionadas aos deslocamentos horizontais. Desta forma, optou-se em proceder com análise comparativa entre os próprios resultados de campo, confrontando o comportamento dos grupos entre si.

- Grupo 1.

As Figuras 6-53 a 6-55 apresentam a evolução dos deslocamentos horizontais parciais, velocidades médias dos deslocamentos horizontais e deslocamentos horizontais acumulados

registrados para os MS do grupo 1.

Com base nelas é possível observar que durante todo período analisado os deslocamentos horizontais parciais registrados apresentaram comportamentos similares, com direções aleatórias, porém com intensidades diferentes. Mesmo com o início da recirculação do chorume os MS-01 e MS-02 mantiveram velocidades médias de deslocamento horizontal similares as registradas no período sem a recirculação, todavia os deslocamentos parciais foram mais intensos após a taxa de injeção avançar dos 40 m³/dia para os 60 m³/dia.

O MS-04 apresentou deslocamentos horizontais parciais com direções aleatórias similares aos demais MS do grupo até a taxa de injeção atingir os 100 m³/dia, após este patamar as direções continuaram aleatórias, todavia em sentidos opostos aos demais MS do grupo. As intensidades destes deslocamentos ficaram mais intensas que as demais registradas no grupo a partir do avanço da taxa de injeção dos 80m³/dia para os 100m³/dia.

Ainda com base nas Figuras, observa-se que em geral os deslocamentos ocorreram predominantemente no sentido de fora para dentro do maciço, sugerindo uma estabilidade. Também é possível observar a interferência direta da recirculação do chorume nos deslocamentos horizontais acumulados a partir do momento em que a taxa de injeção atinge os 40m³/dia.

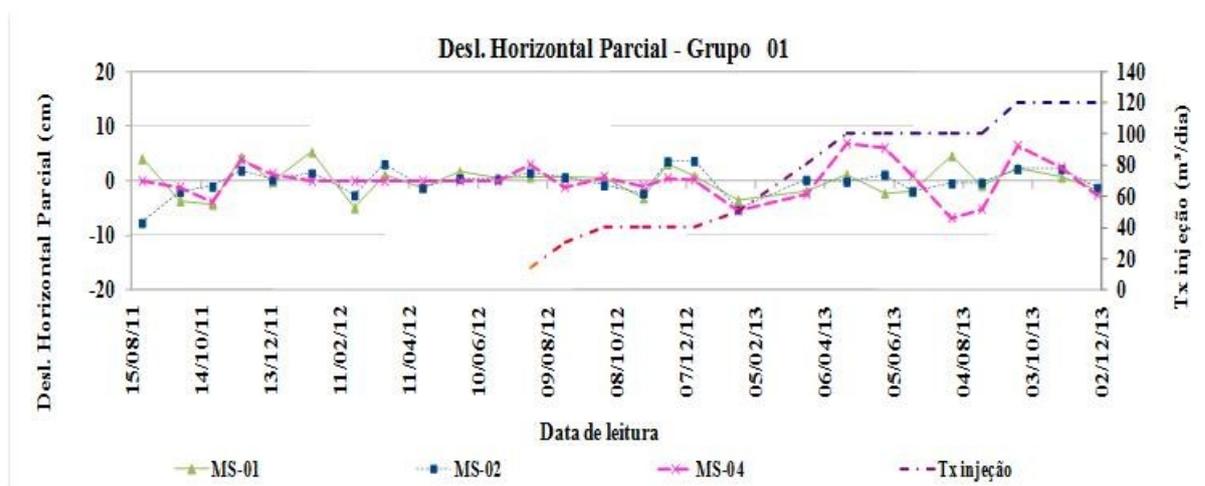


Figura 6-53 – Evolução dos deslocamentos horizontais parciais - marcos superficiais grupo 1.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

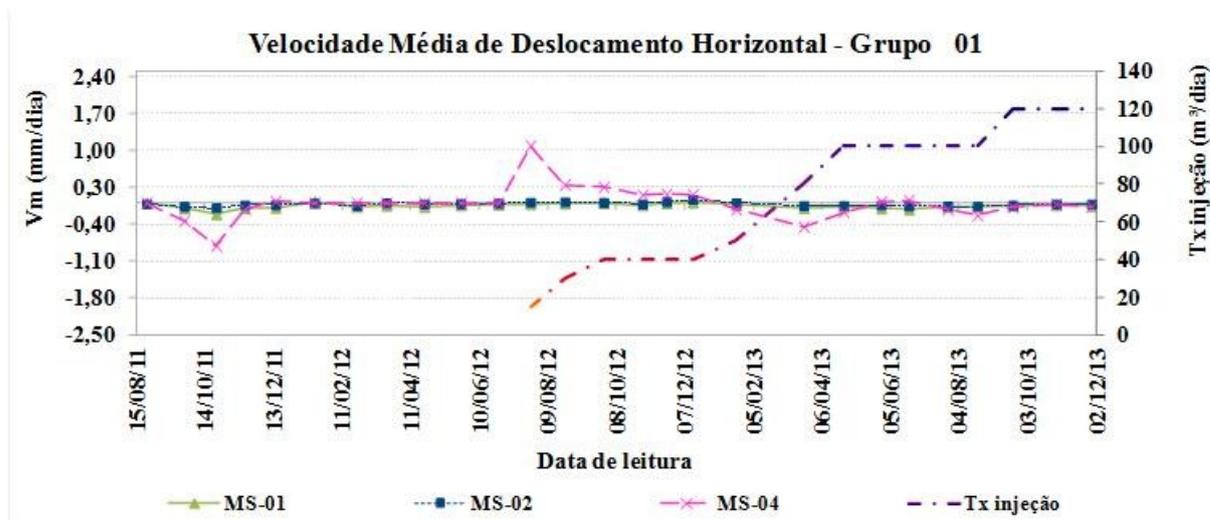


Figura 6-54 – Velocidades médias dos deslocamentos horizontais - marcos superficiais grupo 1.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

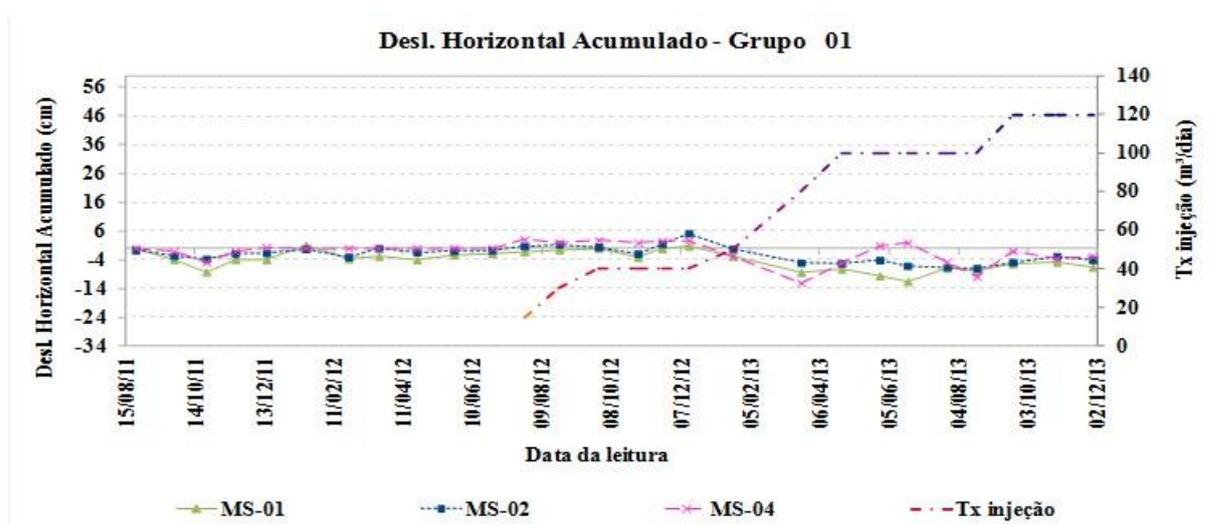


Figura 6-55 – Evolução dos deslocamentos horizontais acumulados - marcos superficiais grupo 1.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

- Grupo 2.

As Figuras 6-56 a 6-58 apresentam a evolução dos deslocamentos horizontais parciais, velocidades médias dos deslocamentos horizontais e deslocamentos horizontais acumulados registrados para os MS do grupo 2.

Com base nas Figuras, observa-se que durante todo período analisado os deslocamentos

horizontais parciais registrados nos MS do grupo apresentaram comportamentos distintos, com direções aleatórias, intensidades diferentes e baixas velocidades médias de deslocamento horizontal.

Não foram registradas alterações significativas no comportamento dos MS após a aplicação da técnica de recirculação. Apenas a região do MS-10 apresentou sutil diferença na intensidade do deslocamento após a taxa de recirculação avançar para 80m³/dia. Percebe-se também que assim como no grupo 1 os deslocamentos predominaram no sentido de dentro para fora do maciço, todavia com maiores intensidades.

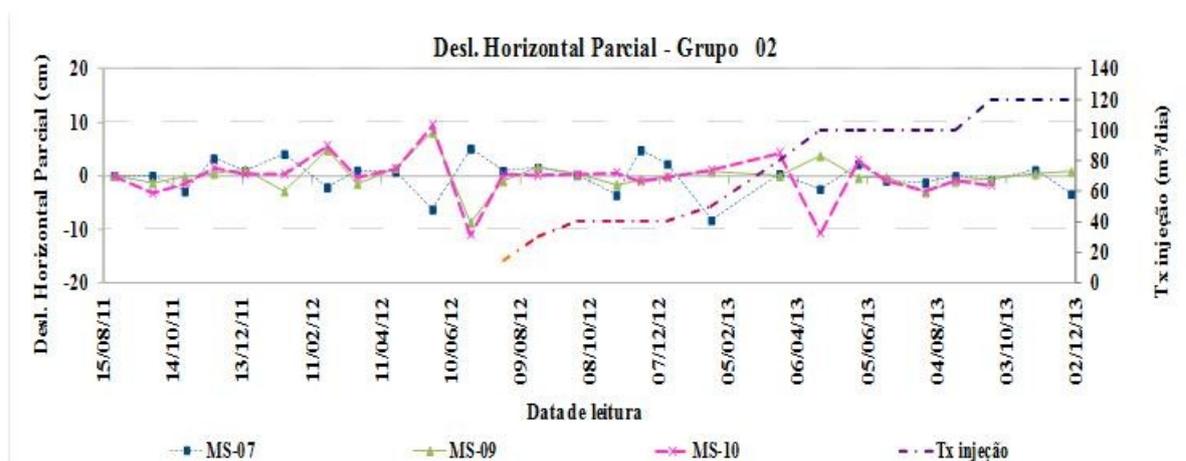


Figura 6-56 – Evolução dos deslocamentos horizontais parciais - marcos superficiais grupo 2.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

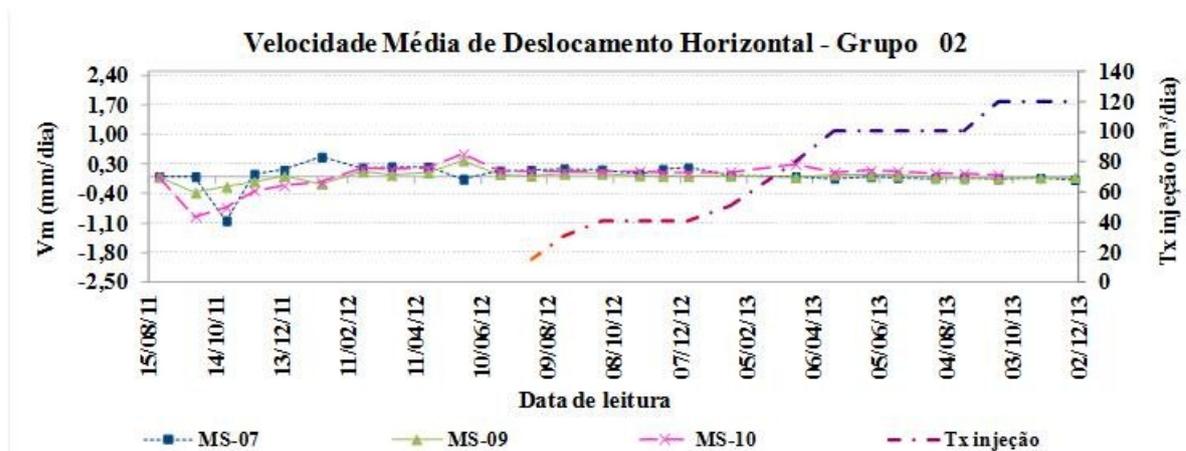


Figura 6-57 – Evolução dos deslocamentos horizontais acumulado - marcos superficiais grupo 2.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

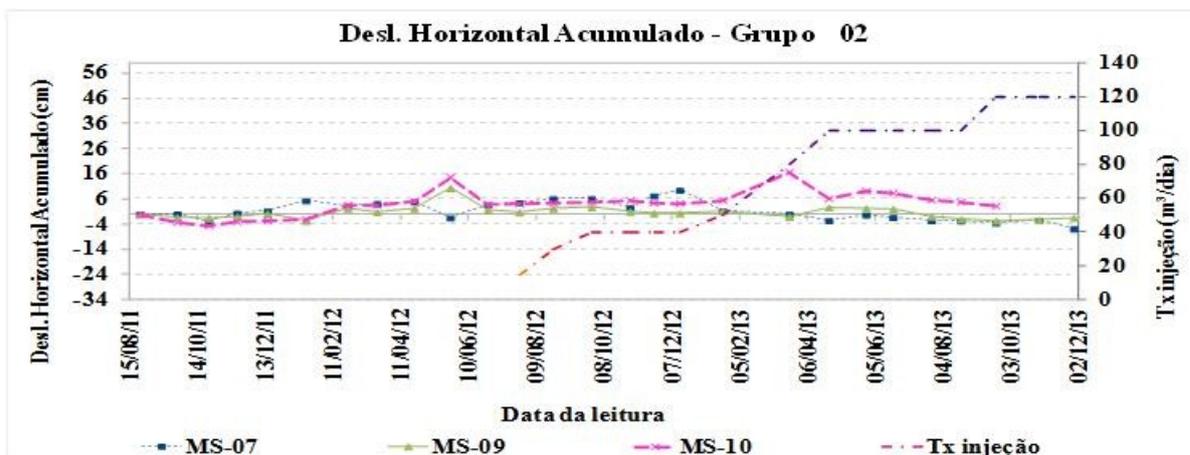


Figura 6-58 – Velocidades médias dos deslocamentos horizontais - marcos superficiais grupo 2.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

- Grupo 3.

As Figuras 6-59 a 6-61 apresentam a evolução dos deslocamentos horizontais parciais, velocidades médias dos deslocamentos horizontais e deslocamentos horizontais acumulados registrados para os MS do grupo 3.

Com base nas figuras é possível observar a existência de diferentes padrões de deslocamento dentro do grupo:

- O primeiro antes da recirculação, com deslocamentos predominantes no sentido de fora para dentro do talude, registrado nas zonas dos MS-14 e MS-15. Percebe-se também que a aplicação da técnica de recirculação impactou nos deslocamentos nessas zonas, cujos deslocamentos continuaram aleatórios, porém com maiores intensidades. Com a elevação da taxa de injeção de chorume para os 100m³/dia as regiões destes MS começaram a sugerir uma conformidade, uma vez que as velocidades médias de deslocamentos foram reduzidas e os deslocamentos parciais ficaram mais discretos.
- O segundo padrão foi registrado através dos MS-16 e MS-17 que apresentaram movimentações predominantes no sentido de dentro para fora do talude. As maiores intensidades foram registradas após o início da recirculação do chorume na região do MS-17. Acredita-se que tal comportamento esteja relacionado com a idade do RSU disposto (mais recentes) e localização na região mais elevada da macrocélula. É percebido também a continuidade das movimentações na região do MS-17 até o final

do período analisado, sugerindo a manutenção da atividade microbiana.

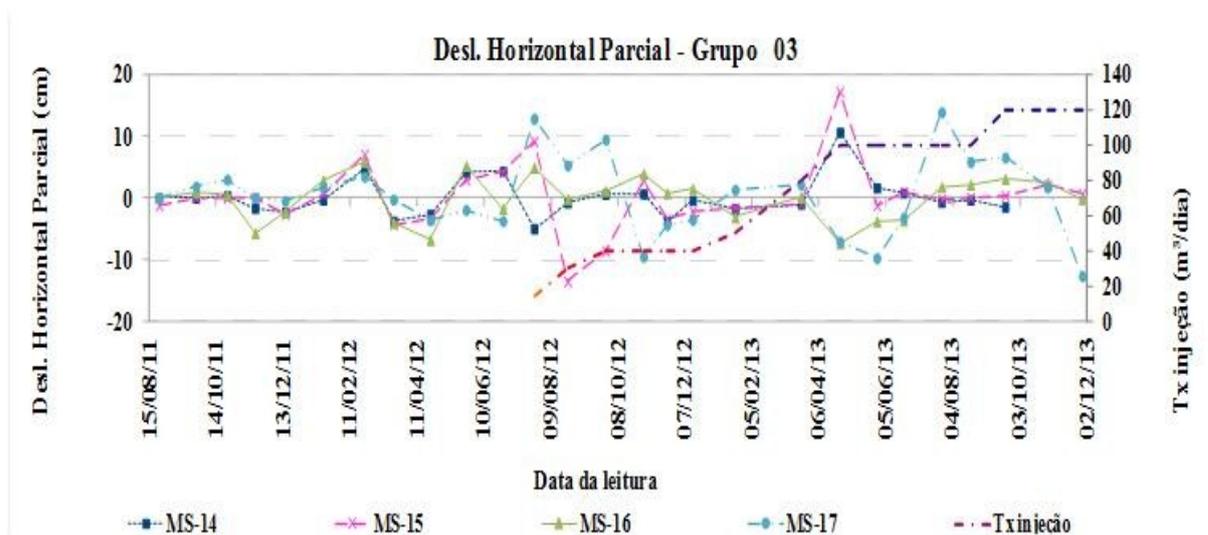


Figura 6-59 – Evolução dos deslocamentos horizontais parciais - marcos superficiais grupo 3.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

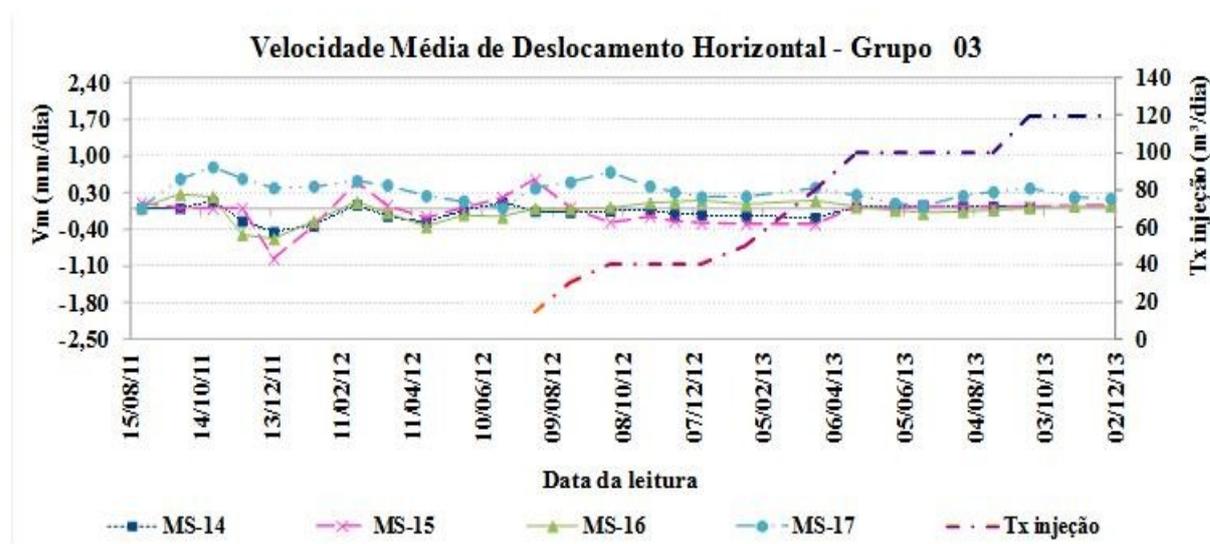


Figura 6-60 – Velocidades médias dos deslocamentos horizontais - marcos superficiais grupo 3.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

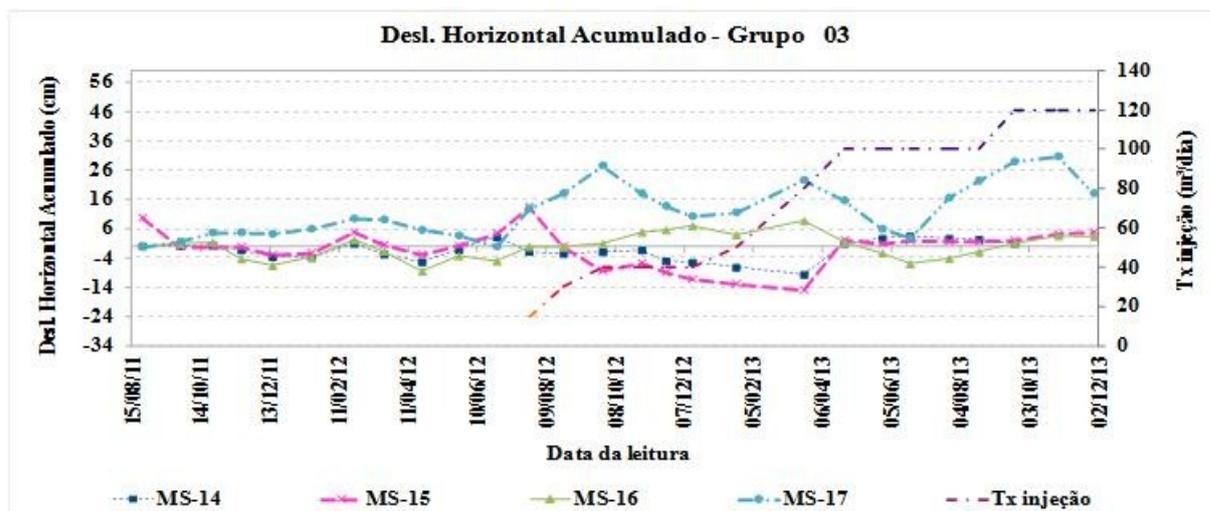


Figura 6-61 – Evolução dos deslocamentos horizontais acumulado - marcos superficiais grupo 3.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

- Grupo 4.

As Figuras 6-62 a 6-64 apresentam a evolução dos deslocamentos horizontais parciais, velocidades médias dos deslocamentos horizontais e deslocamentos horizontais acumulados registrados para os MS do grupo 4.

O MS-22 foi o marco que registrou maior movimentação após o início da recirculação do chorume, com predomínio de deslocamentos no sentido de dentro para fora do maciço. Destaca-se que esta foi a zona com maior intercorrências registradas ao longo do processo analisado, incluindo deslocamento de solo de cobertura durante o período das fortes chuvas. Maiores informações a respeito das intercorrências durante a recirculação encontram-se listadas no apêndice.

Aparentemente a zona do MS-21 foi a que menos sofreu interferências com a recirculação do chorume. Com base na velocidade média de deslocamento horizontal e no deslocamento horizontal acumulado percebe-se uma tendência de estabilização (conformidade).

A região do MS-20 continuou apresentando movimentações com direções aleatórias de baixa intensidade mesmo com o início da recirculação do chorume, não havendo ainda o indicativo de estabilização.

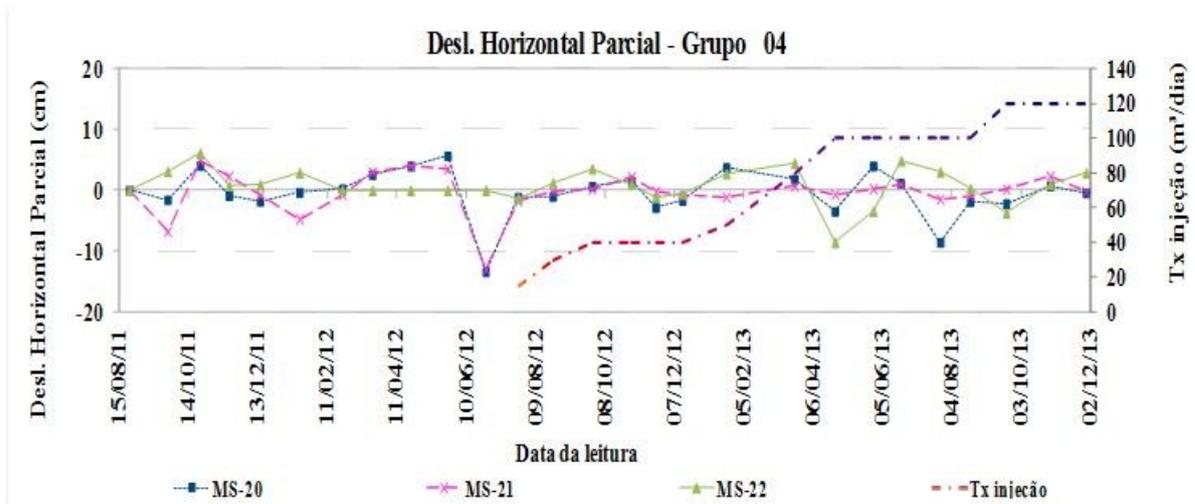


Figura 6-62 – Evolução dos deslocamentos horizontais parciais - marcos superficiais grupo 4.

Fonte: Dados de Campo - Autora.



Figura 6-63 – Velocidades médias dos deslocamentos horizontais - marcos superficiais grupo 4.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

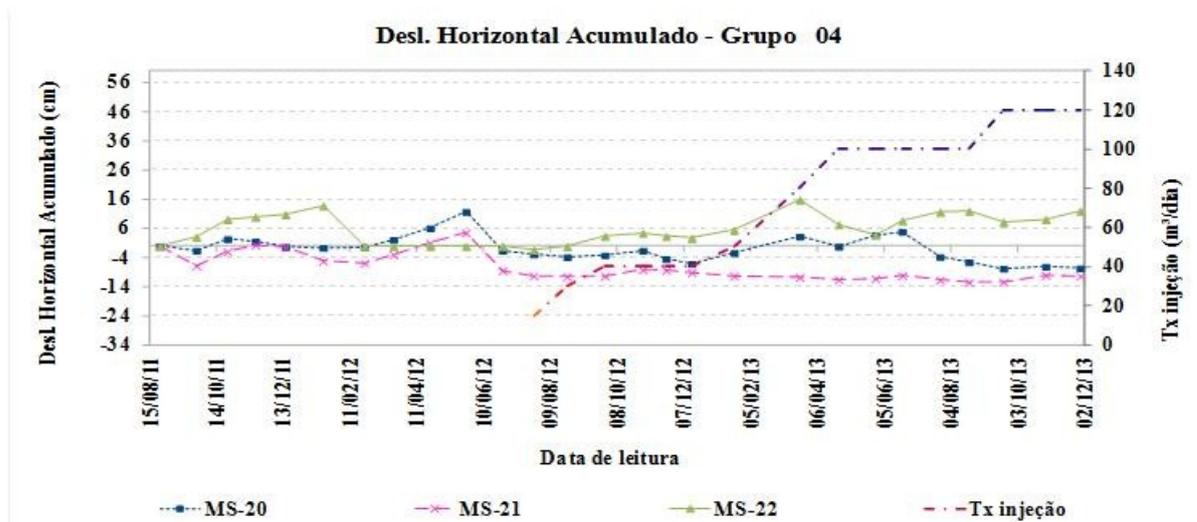


Figura 6-64 – Evolução dos deslocamentos horizontais acumulados - marcos superficiais grupo 4.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

- Grupo 5.

As Figuras 6-65 a 6-67 apresentam a evolução dos deslocamentos horizontais parciais, velocidades médias dos deslocamentos horizontais e deslocamentos horizontais acumulados registrados para os MS do grupo 5.

Através das Figuras observa-se uma ausência de um padrão nos deslocamentos do grupo, o que sugere uma movimentação estável, já que não foi evidenciada tendência de movimentação para fora do maciço. Tomando como parâmetro a velocidade média de deslocamento horizontal nota-se uma constância nos MS-23 e MS-24. O mesmo não é evidenciado no MS-25, onde após o início da recirculação do chorume foi registrada atividade acentuada, o que indica continuidade nas movimentações (aleatórias).

Percebe-se também que de uma maneira geral, após a taxa de injeção atingir os 100 m³/dia os deslocamentos deste grupo registraram menores intensidades e mais similaridade na direção, sugerindo uma acomodação nessa região do maciço.

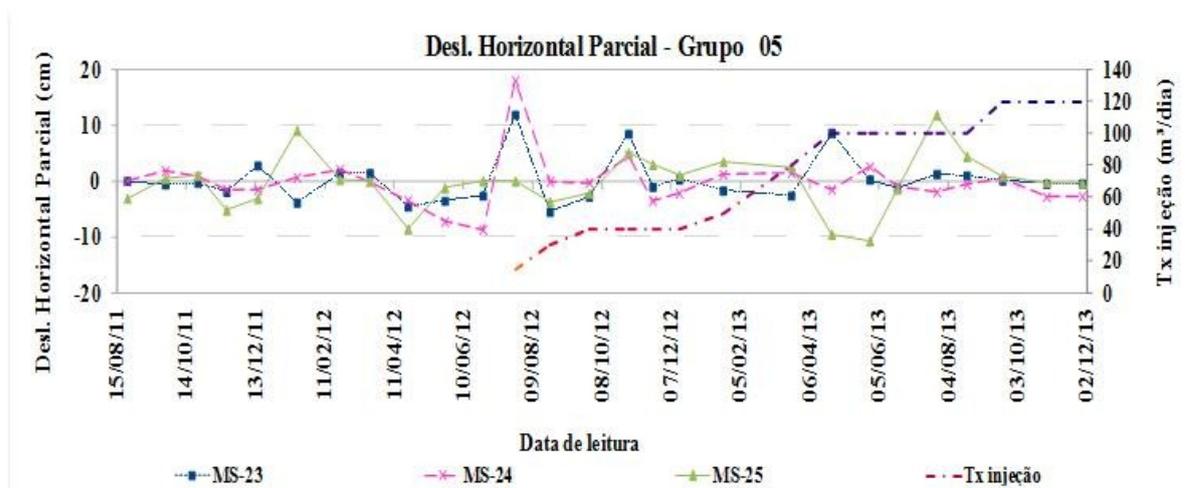


Figura 6-65 – Evolução dos deslocamentos horizontais parciais - marcos superficiais grupo 5.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

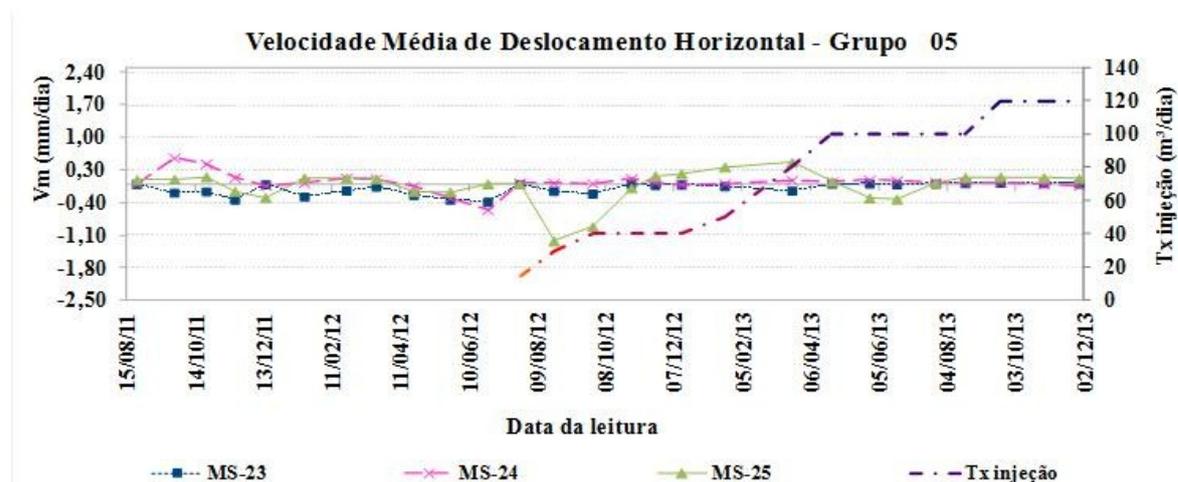


Figura 6-66 – Velocidades médias dos deslocamentos horizontais - marcos superficiais grupo 5.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

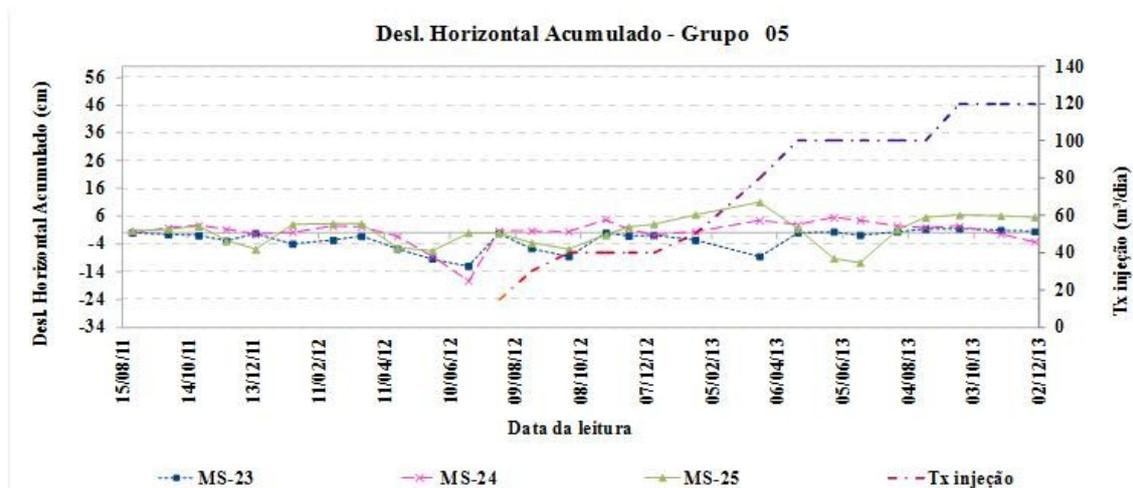


Figura 6-67 – Evolução dos deslocamentos horizontais acumulado - marcos superficiais grupo 5.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

- Grupo 6.

As Figuras 6-68 a 6-70 apresentam a evolução dos deslocamentos horizontais parciais, velocidades médias dos deslocamentos horizontais e deslocamentos horizontais acumulados registrados para os MS do grupo 6.

Os MS-26, MS-27 e MS-29 apesar de estar em zonas distintas apresentam comportamentos similares, mesmo estando em áreas com influência indireta da recirculação e com cotas mais baixas.

Quando comparado com o restante do grupo, o MS-28 apresenta comportamento similar até o início do processo de injeção do chorume, todavia, após a elevação da taxa de recirculação para 60 m³/dia a direção permanece alinhada com os demais MS do grupo, porém com intensidades muito elevadas. Tal comportamento pode estar relacionado com o fato deste MS está situado no topo do maciço e em região com resíduos mais recentes, além de sofrer influência direta da recirculação em função da sua proximidade com o sistema de injeção.

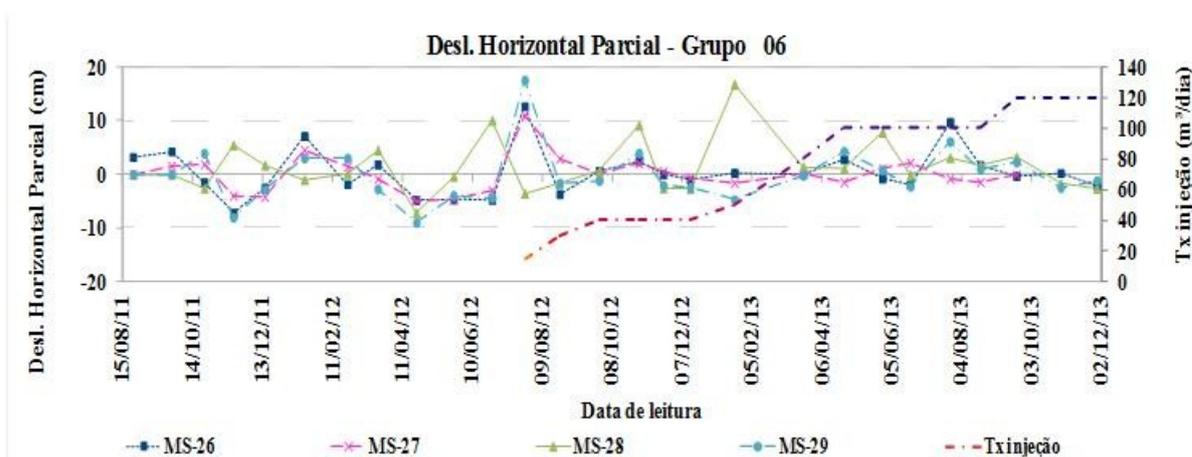


Figura 6-68 – Evolução dos deslocamentos horizontais parciais - marcos superficiais grupo 6.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

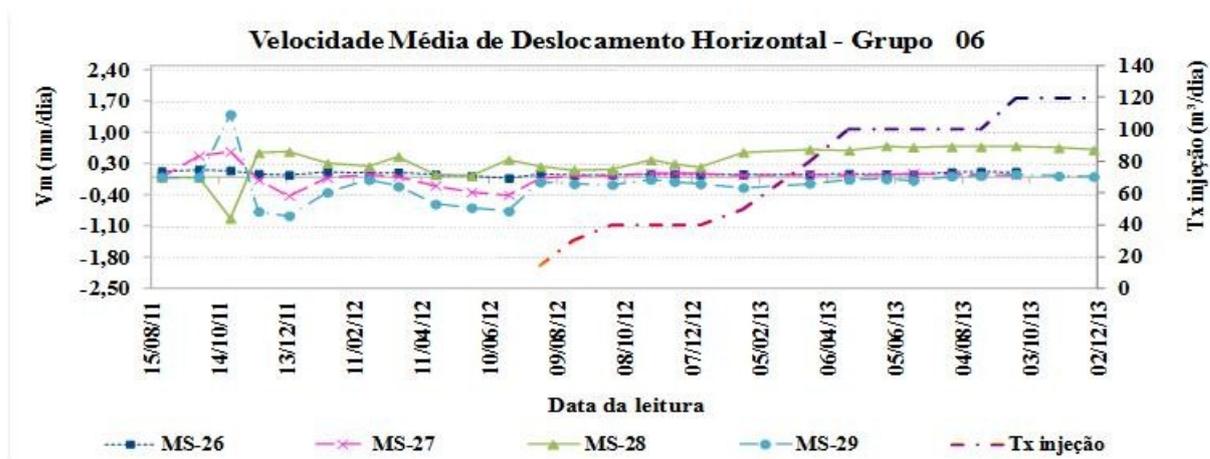


Figura 6-69 – Velocidades médias dos deslocamentos horizontais - marcos superficiais grupo 6.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

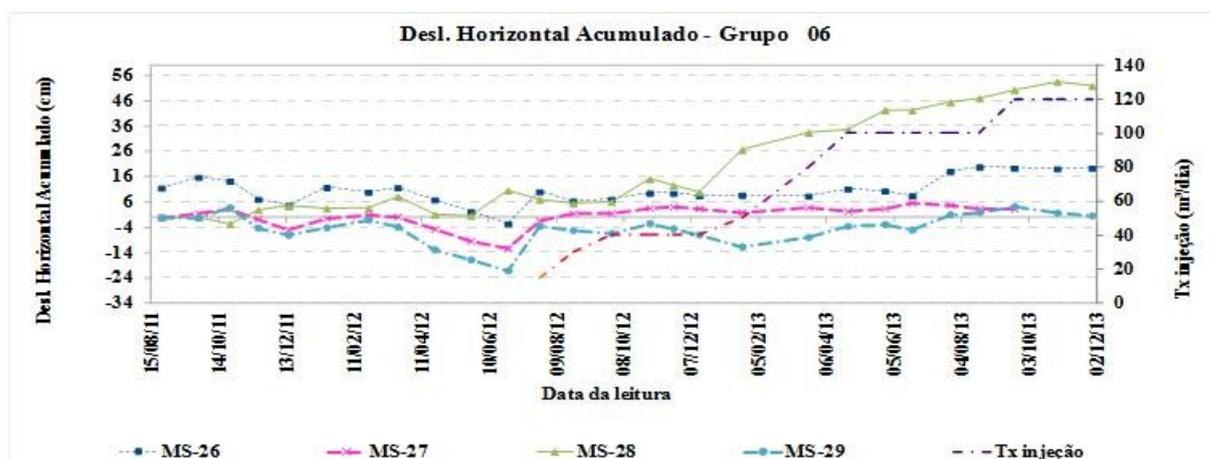


Figura 6-70 – Evolução dos deslocamentos horizontais acumulado - marcos superficiais grupo 6.

Fonte: Dados de Campo - Autora.

7. Considerações finais

O desenvolvimento dessa pesquisa mostrou que a aplicação da técnica de recirculação do chorume na macrocélula de disposição de resíduos sólidos urbanos, com idade de aterramento superior a 10 anos, pouco interferiu na digestão anaeróbia, uma vez que os RSU ali aterrados já se encontravam em estágios avançados de decomposição da matéria orgânica e consequentemente baixos potenciais de produção de biogás.

Apesar dos tímidos resultados alcançados referentes a deslocamentos (verticais e horizontais) acredita-se que essa técnica seja eficiente em células com RSU jovens, uma vez que durante a pesquisa ficou constatada a interferência direta da técnica na aceleração ou reativação dos deslocamentos nas áreas cuja idade de aterramento eram inferiores a 8 anos (MS-04, MS-17, MS-22 e MS-28).

Conforme relatado em diversos trabalhos disponíveis na literatura e citados nesta pesquisa, a aplicação da técnica requer atenção especial com relação aos deslocamentos horizontais. Apesar de não serem evidenciados eventos significativos diretamente relacionados com a recirculação, foram registrados eventos ao longo da pesquisa que culminaram em trincas, aberturas de fendas e possível movimentação e/ou arraste de material para os drenos. Todos estes estão listados no item 10.1 no apêndice.

Diferentemente do constatado em pesquisas, tais quais apresentadas por Scudato *et al.* (1993); Vizler *et al.* (1993), no ASMC não foi possível evidenciar redução da carga orgânica e ou melhora qualitativa dos parâmetros analisados no chorume recirculado e/ou armazenado nas bacias de contenção, uma vez que durante toda pesquisa as bacias de contenção permaneceram recebendo contribuições do sistema de drenagem de chorume de todo ASMC.

Quando o foco da pesquisa é direcionado para otimização da produção do biogás, não foram evidenciadas alterações no comportamento dos drenos individuais localizados na macrocélula que garantissem a viabilização da técnica em células com RSU com tempo de aterramento variando dos 4 a 17 anos. Todavia, quando analisada a produção global de gás na macrocélula e comparando com a produção prevista e a registrada no período antecedente a recirculação nota-se que a aplicação teve influência positiva, uma vez que os níveis de produção global foram mantidos – mesmo com vazão insignificante que inviabiliza investimentos para captação do CH₄ remanescente nessa célula.

Diferentemente do apresentado por Manzur (2010), cuja recirculação impactou positivamente na composição do biogás de modo a proporcionar um aumento do percentual de metano, no ASMC não foram detectadas interferências na composição do biogás durante a aplicação da técnica, ou seja, os percentuais de CH₄ e CO₂ permaneceram dentro dos mesmos padrões registrados antes de recirculação.

8. Sugestões para trabalhos futuros

Diante da magnitude de pesquisas relacionadas a interferências da recirculação de chorume em aterros sanitários e da necessidade de preenchimento de lacunas do conhecimento existentes nesta área de pesquisa sugere-se:

- Ampliação do horizonte de pesquisa para no mínimo 24 meses no intuito de possivelmente esgotar a decomposição da fração orgânica dos RSU e chegar na estabilização das movimentações no maciço e desta forma comparar os resultados de campo com os modelos de previsão de recalques;
- Aplicação da técnica aqui apresentada em células de RSU mais jovens, com menor idade de aterramento de resíduos por um período de 24 a 36 meses de pesquisa para que seja possível acompanhar as interferências na produção ou qualidade de biogás produzido;
- Ampliar o estudo visando o desempenho financeiro e retorno do investimento de forma a estabelecer uma relação custo benefício para a gestão do aterro;
- Realizar perfurações em diferentes pontos da Macrocélula para investigação da biodegradabilidade dos RSU após a inserção do sistema de recirculação de lixiviados.

9. Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. ANEEL. Brasília. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10005: Lixiviação de resíduos – procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10006: Solubilização de resíduos – procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10007: Amostragem de resíduos – procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

BARALDI, R. C. O. **Efeitos da recirculação de lixiviados na biodegradação de resíduos sólidos em uma célula do Aterro da Muribeca- PE**. Dissertação (Mestrado), Centro de Tecnologia – CTG, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, 98p. 2003.

BARLAZ, M. A. et al. **Evaluating environmental impacts of solid waste management alternatives**. Biocycle. 2003.

BARBOSA, H.R., TORRES B.B. “**Nutrição e Metabolismo Bacteriano**” In: Trabulsi, L.R., Altherthum, F., Gompertz, O.F., Candeias, J.A.N. (eds) *Microbiologia*. 3 ed, São Paulo, Atheneu, Cap 3, pp. 585. 1999.

BARROS, R.T.V., **Resíduos Sólidos**. Apostila da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 1998.

BAYARD, R.; GACHET, C.; ARCHOUR, F.; BRAUER, C.; GOURDON, R. **Organic matter stabilization of sorted MSW under leachate recirculation**. Proceedings Sardinia, Tenth

International Waste Management and Landfill Symposium. Cagliari, Italy, 2005.

BIDONE, F.R.A. **“Resíduos Sólidos Provenientes de Coletas Especiais: Eliminação e Valorização”**, Projeto PROSAB 2 – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, ABES Rio de Janeiro. pp. 1-218. 2001.

BJARNGARD, A, EDGERS, L. **“Settlements of Municipal Solid Waste Landfills”**. Proc. 13th Annual Madison Waste Conference, Madison. pp. 192-205. 1990.

BOSCOV, M. E. G. **Geomecânica dos resíduos sólidos urbanos. Geotecnia Ambiental**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, cap. 2, p.31-62. 2008.

BRASIL. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2012 – Ano base 2011: Resultados Preliminares**. Rio de Janeiro: EPE, 2012.

CALDAS, Á. S. **Geração de metano devido à digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos - estudo de caso do Aterro Sanitário Metropolitano Centro, Salvador – BA**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Bahia. 154 p. : il. color. 2011.

CARVALHO, J. L. V. **Estimativa energética e recuperação de metano de RSU por digestão anaeróbia e poder calorífico: Estudo de caso Barreiras – BA**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador. 128 p. 2013.

CETESB/SMA – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental & SMA-SP – Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Relatório técnico nº 2 do convênio SMA/CT nº 01.0052.00/2001 – aterros**. São Paulo, 2003. 349 p.

CHAN G.Y. S., CHU L.M. and WONG M.H. **Effect of leachate recirculation on biogás production from landfill codisposal of municipal solid waste, sewage sludge and marine sediments** *Environ. Pollut.*, 118: pp 393–399. 2002.

CINTRA, Ilka Soares. **Estudo da Influência da Recirculação de Chorume Cdu e Chorume Inoculado na Aceleração do Processo de Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento

de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. 352 p. 2003.

DANESE, Modesto. **Geração e Utilização de Biogás**. Associação Brasileira de Conservação de Energia. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo. 1981.

ENSINAS, Adriano Viana. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário delta em Campinas - SP** / Adriano Viana Ensinas. - Campinas, SP: s.n., 2003.

FARIAS, A. B., **Parâmetros de Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil. Junho de 2000.

GANDOLLA, M., ACAIA C. & DECKA I. **Predition of Settlement at MSW Disposal Sites. 2000.**

GANDOLA, M.; DUGNANI, L. , BRESSI, G. & ACAIA, C.. **A determinação dos efeitos do recalque sobre os depósitos de lixo sólido municipal**. Simpósio Internacional de Destinação do Lixo, novembro, Salvador. 1994.

GHANEM, I. I. I.; GUOWEI, G. and JINFU, Z. **Leachate production and disposal of kitchen food solid waste by dry fermentation for biogas generation**. Renewable Energy. v.23, p.673-684. 2001.

HAMADA *et al*, **Estimativas de Geração e Caracterização do Chorume em Aterros Sanitários**. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2000, João Pessoa. Anais. 9p. 2000.

HANSEN T.L.; SCHMIDT J.E.; ANGELIDAKI I.; MARCA E.; JANSEN J.C.; MOSBAEK H.; CHRISTENSEN, T. H. **Method for determination of methane potentials of solid organic waste**. Waste Management, v. 24, p.393-400, 2004.

IAWG (International Ash Working Group: Chandler, A.J., Eighmy, T.T., Hartlén, O., Kosson, D., Sawell, S.E., van der Sloot, H., Vehlow, J.), **Municipal Solid Waste Incinerator**

Residues, Studies in Environmental Science, Vol. 67, Elsevier Science, Amsterdam. 1997.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual, Vol.3**. 1996.

JARDIM, Nilza Silva *et al.* **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**. São Paulo, IPT-CEMPRE, 2ª edição. 2000.

KEBEKUS, Fraube *et al.* **Tratamiento Mecánico - Biológico de Desechos?** In: Proyecto Sectorial "Promocion del Tratamiento Mecánico - Biológico de Desechos" . Alemanha, Edição GTZ. 2000.

LANGE, L. C., AMARAL, M. C. S.. **Geração e Características do Lixiviado** . In: GOMES, L.P. (org) PROSAB - Resíduos Sólidos: Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras. Rio de Janeiro: PROSAB, 360 p. 2009.

LIBANIO, P. A. C.. **Avaliação da Eficiência e Aplicabilidade de um Sistema Integrado de tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos e Chorume**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais. 2002.

LIMA, L.M.Q. NUNES, C.R.. **Aterro Sanitário Celular**. 1994.

LIMA, L.M.Q., **Estudos da Influência da Reciclagem de Chorume na Aceleração da Metanogênese em Aterro Sanitário**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo (USP) – São Carlos. Vol I., pp. 01-433. 1988.

LOBO, A. G. de C.. **Desarrollo de MODUELO 2: herramienta para La evaluación de La contaminación producida em vertederos de resíduos sólidos urbanos**. 2003. 335 f. Tesis (Doctoral) - Departamento de Ciencias y Técnicas del Água y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Santander, 2003.

MACHADO, S. L., CARVALHO, M. de F., GOURC, J. P., VILAR, O. M., NASCIMENTO,

J. C. F. **Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results.** Waste Management, v.29, p.153-161, 2009.

MACHADO, S. L., CARVALHO, M. de F., NASCIMENTO, J. C. F., CALDAS, A. S.. **Aterro Sanitário Metropolitano Centro. Caracterização de Resíduos Aterrados visando à Estimativa do Potencial de Geração de Gás.** Relatório Interno, 48 p. 2008.

MACHADO, S. L., CARVALHO, M. de F., NASCIMENTO, J. C. F., CALDAS, A. S.. **Estudo da Geração de Metano produzido no Aterro Sanitário Metropolitano Centro.** Relatório Interno, 28 p, 2010.

MACIEL, F. J.. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências - CTG, UFPE, Recife. 333 p. 2009.

MANZUR, S. R. **“Effect of leachate recirculation on methane generation of a bioreactor landfill”.** Master of Science in Civil Engineering. The University of Texas at Arlington. 2010.

MARKOVICH, A, V. Petrova, L.Y.. **Chromatography of Proteins on Cellulose Ionites.** Acad. SCI. USSR, Moscow. 1996.

MATEUS, M. S. C. S.. **Proposta de Modelo para Avaliação do Balanço Hídrico de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso do Aterro Metropolitano Centro de Salvador-BA.** Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, XXIV, 312p. 2008.

MELO, Marcio Camargo De. **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca.** Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Pernambuco. CTG. Engenharia Civil. Recife, xii 127 folhas. 2003.

MENDES, T. A. et al. **Parâmetros de uma pista experimental executada com entulho reciclado.** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - 35, 2004, Rio de Janeiro. Resumo. Rio de Janeiro, 2004.

MENEZES, R. A. A.; GERLACH, J. L.; MENEZES, M. A.. **Estágio atual da incineração no Brasil**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E LIMPEZA,7, Curitiba, 2000.

METHA, Rinav *et al.* **Refuse Decomposition in the Presence and Absence of Leachate Recirculation**. Journal Of Environmental Engineering. March, 2002.

MONTEIRO, V.E.D. *et al.* **Uma análise comparativa de recalques superficiais e em profundidade no aterro da Muribeca**. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, RS. 2000.

MOREDA, I.L. **“El Asentamiento en un Relleno Sanitario y su Relación com la Biodegradación”**. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería sanitaria y Ambiental. Porto Alegre, RS. 2000.

MORRIS, M. W. L. **Energy recovery from solid waste fuel using advanced gasification technology**. International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies, Orlando, Florida/EUA, University of California. 1999.

NASCIMENTO FILHO, I.; MÜHLEN, C. V.; CAMARÃO, E. B. **Estudo de compostos orgânicos em lixiviados de aterros sanitários por EFS e CG/EM**. Química Nova. V. 24, (4), p. 554-556, 2001.

O'KEEFE, D.M., CHYNOWETH, D.P., 2000. **Influence of phase separation, leachate recycle and aeration on treatment of municipal solid waste in simulated landfill cells**. Bioresource Technol. 72, 55-66. 2000.

OLIVEIRA, C. **Avaliação do potencial de contaminação de dois solos agrícolas com lodo de esgoto enriquecido com Cd, Pb, e Zn. Seropédica**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (Tese de Doutorado), pp.191,. 1998.

OLIVEIRA, S., PASQUAL, A.. **Monitoramento do lixiviado de aterro sanitário**. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental (AIDIS), 27, 2000, Porto

Alegre. Anais... Porto Alegre: Associação de Engenharia Sanitária e Ambiental: AIDIS, 2000.

OLIVEIRA, L. B. R., Luiz Pinguelli. **Brazilian Waste Potential: energy, environmental, social and economic benefits.** Energy Policy 31:1481-1491. 2003.

OONK, J. & BOON, A. **Landfill gas formation, recovery and emissions.** – Institute Of Environmental And Energy Technology (TNO). R95-203. Apeldoorn, The Netherlands, 1995.

PALMISANO, A. C., BARLAZ, M. A.. **Microbiology of Solid Waste.** New York: 1996.

PEREIRA, A.G.H.. **Compressibilidad de los Residuos Sólidos Urbanos,** Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, España. 2000.

PESSIN, N.; SILVA, A.R.; BRUSTOLIN, I.; MANDELLI, S.M.C.; PANAROTTO, C.T. **Variação da Composição dos Líquidos Percolados do Aterro Sanitário de São Giácomo - Caxias do Sul – RS.** Anais do XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Foz do Iguaçu, 1997.

PESSIN, N.; SILVA, A.R.; MANDELLI, S.M.C.; BRUSTOLIN, I.; PANAROTTO, C.T. **Contribuição do Monitoramento Ambiental para o Entendimento do Processo de Estabilização de Resíduos Sólidos Domiciliares em Aterros Sanitários.** Anais do IX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Seguro, 2002.

PICANÇO, A. P. **Influência da recirculação de percolado em sistemas de batelada de uma fase e híbrido na digestão da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos.** 135 f. Tese [Doutorado em Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento)] - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PINTO, C.S.. **“Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas”** Ed. Oficina de Textos, São Paulo. pp 107-120. 2000.

PINTO, D. M. L. **Avaliação da Biodegradabilidade da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Domésticos.** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - USP. (Tese, Doutorado em Hidráulica e Saneamento). 2000.

PINTO, A. R. e JÚNIOR, D. R. P. **Biodegradabilidade anaeróbia de líquidos percolados gerados em aterros de resíduos sólidos urbanos.** Pernambuco. In: IV OFICINA E SEMINÁRIO LATINO-AMERICANO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA, Anais: v.2, 2000. p.163-166.

POHLAND, J. G., HARPER, S. R.. **Critical review and summary of leachate and gas production from landfills.** Atlanta, Georgia Institute of Technology, School of Civil Engineering, 165 p. 1985.

POHLAND, F. G., and KIM, J. C. **“In situ anaerobic treatment of leachate in landfill bioreactors.”** *Water Sci. Technol.*, 40, 203–210. 1990.

POHLAND, F. G., and KIM, J. C. **In situ anaerobic treatment of leachate in landfill bioreactors.** *Water Sci. Technol.*, 40, 203–210. 1999.

PLOUTAKHINA, MARINA. **Case Study #6: Vega Landfills Assessment, Bahia, Brazil.** Technical Report. FI/GLO/99/H06/11-51. United Nations Industrial Development Organization. Vienna. 2001.

QUINA, M.M.J., **Processos de inertização e valorização de cinzas volantes - Incineração de resíduos sólidos urbanos.** Tese doutoramento Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Coimbra, Coimbra, 423 p. 2005.

REES, J.F. and GRAINGER, J.M.. **Rubbish dump or fermenter – prospects for the control of refuse fermentation to methane in landfills.** *Process Biochemistry*, 17 (6), 41–44. 1982.

REICHARDT, K. **Água em Sistemas Agrícolas.** São Paulo: Editora Manoele LTDA. 1990.

REINHART, D.R. and AL-YOUSFI, A.B. **The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics.** *Waste Manag. and Res.*, v.14, p.337-346. 1996.

ROBINSON, H. D., **The Treatment of Landfill Leachates Using Reed Bed Systems”.** *Proceedings of Fourth International Landfill Symposium, Sardinia, Italy, 1993.* pp.907-921.

RUSSO, M. A. T.; FERREIRA, M.; VIEIRA, C. **Caracterização de lixiviados de aterros sanitários de alta compactação.** Anais do IX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Seguro, 2000a.

SHARHOLY M.; AHMAD K.; MAHMOOD G.; TRIVEDI R.C. **Municipal solid waste management in Indian cities – A review** Waste Management, Volume 28, Issue 2, p.459-467, 2008.

SILVA, E.A.; COSSICH, E.S.; TAVARES, C.R.G.; CARDOSO FILHO, L.; GUIRARDELLO, R. **Modeling of copper (II) biosorption by marine alga Sargassum sp. In fixed-bed column.** Process Biochemistry. v. 38, p.791-799. 2002.

SCRUDATO, R. J., *et al.*. **Leachate Recirculation in a Normally Placed and Estabilized Refuze.** Proceedings of Fourth International Landfill Symposium, Sardinia, Italy, pp.969-993. 1993.

SEGATO, L. M., SILVA, C. L.. **Caracterização do chorume do Aterro Sanitário de Bauru.** In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental (AIDIS), 27, 2000, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: Associação de Engenharia Sanitária e Ambiental: AIDIS, 2000.

SPONZA D.T. and AGDAG O.N. **Impact of leachate recirculation and recirculation volume on Stabilization of municipal solid waste in simulated anaerobic bioreactors** Process Biochem, 2004. pp 2157-2165.

SOLVÍ. Bahia Transferência e Tratamento de Resíduos S.A - BATTRE. **Resíduos.** São Paulo, 2010. Disponível em < <http://www.solvi.com/BATTRE/>>. Acesso em: 22 julho de 2012.

SOWERS, G. F. **Settlement os waste disporsal fills.** In: International Conference on Soil Mechanics and Fundation Engineering, 8, 1973, Moscow. Anais. Moscow, v.22, 1973. P.207-210.

STRICKLAND, Jonathan. **Como funcionam os conversores de plasma.** Traduzido por HowStuffWorks Brasil, 2008. Disponível em: <HTTP://ciencia.hsw.uol.com.br/conversor-de>

plasma.htm. Acesso em 04/02/2014.

TCHOBANOGLIOUS, G. Theisen, H & Eliassen, R.. **“Solid Wastes: Engineering and Management Issues”** Mcgraw-Hill Book Company, N.Y. 1977.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL S. **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues.** USA: McGraw-Hill, 1993. 978 p.

USEPA 2 – United States Environmental Protection Agency. **Energy Project Landfill Gas Utilization Software (E-PLUS) User’s Manual;** EPA-30-8-97-006, 1997.

USEPA. **User’s Manual, Landfill Gas Emissions Model-Version 2.0,** US Environmental Protection Agency, EPA/600/R-98/054, Washington, DC. 1998.

VAZOLLER, R. F. **Microbiologia e Saneamento Ambiental.** 1999. Disponível na Internet: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd59/santana.pdf>. Acessado em setembro de 2012.

10. APENDICE

10.1. Acompanhamento de campo – registro das intercorrências.

Data	Evento
04/07/2012	Iniciou o processo de injeção com vazão de 10 m ³ /dia. A adição aconteceu seguindo a sistemática de lançar chorume em cada lado da linha em momentos distintos. A duração aproximada da injeção foi de 1h e 25 min.
18/07/2012	A sistemática foi alterada. Após o lançamento de chorume nos lados direito e esquerdo (em momentos distintos) procedeu-se o lançamento em ambos os lados simultaneamente. A vazão diária foi alterada para 30 m ³ /dia, de forma que esta foi dividida igualmente para cada lançamento. A duração aproximada dos lançamentos foi de 1h e 10 min.
29/07/12	Não ocorreram lançamentos em função de atividades emergências a serem executadas pelos técnicos que efetuam a manobra.
02/08/2012	Não ocorreram lançamentos em função de atividades emergências a serem executadas pelos técnicos que efetuam a manobra.
21/08/2012	Após o início do primeiro lançamento constatou-se vazamentos em alguns pontos da rede. O lançamento foi interrompido para efetuar manobras de manutenção das linhas. Foram realizadas atividades de limpeza no tanque de chorume e soldagem em alguns trechos. Observou-se incrustações nas paredes do tanque de recirculação de chorume e em alguns trechos do sistema.
24/09/2012	A manobra foi interrompida em função da quebra da válvula de retenção. A mesma foi substituída e o sistema retomou a anormalidade no dia 25/09/2012.
09/11/2012 a 06/12/2012	O sistema esteve inoperante. Foram constatados diversos pontos com incrustações e entrada de ar. Em um lado do ramal (lado da Rua Sucupira) houve recalque acentuado, o que levou a diferenças significativas de cotas, sendo necessária a escavação para corrigir as inclinações do sistema, de forma que ele retomasse a operação normal agindo somente sobre a contribuição da força gravitacional. Do lado oposto (Rua Jacarandá) verificou-se que as atividades de movimentação de terra que aconteciam na célula contribuíram para que em alguns trechos ficassem com cota negativa.
12/12/12	Ocorreu uma pane elétrica no sistema o que impossibilitou o bombeio de chorume da bacia para o tanque. O problema foi solucionado no mesmo dia.
14/12/12 a 17/12/12	Ocorreu outra pane no sistema elétrico. Foi então desconectado a linha para reparos. O continuou inoperante até o dia 17 de dezembro.
28/12/12 a 10/01/2013	No dia 28 de dezembro de 2012 o sistema ficou intermitente. O ramal do lado direito seguiu com a recirculação sem anormalidades, todavia a maior parte do ramal à esquerda não recirculou. Aumentou-se então a abertura da válvula para 30% de abertura para dar vazão ao volume que seguira injetado (3 primeiros drenos e os 3 seguintes após a ramificação). Alinhou-se o ramal com uma bomba a fim de aumentar a pressão e promover o deslocamento do chorume. Com esta manobra o chorume avançou em mais um dreno. Foi também instalado um suspiro no ramal para que o ar presente na tubulação escoasse, minimizando assim a cavitação. O suspiro foi instalado logo após a saída do tanque de recirculação de chorume e no início da tubulação de descarga do

10.1. Acompanhamento de campo – registro das intercorrências.

Data	Evento
	<p>tanque. Procedeu-se então com as escavações para identificar o que estaria ocorrendo com as linhas. Constatou-se que novamente as linhas desceram de cota, seguindo o caminhamento do terreno, formando curvas (vales) ficando em conta inferior a cota do dreno. Reorganizaram-se as curvaturas de forma que o sistema voltasse a operar sem intercorrências. No fim da tarde do dia 10 de janeiro de 2013 o sistema retornou a normalidade com vazão de 40m³ dia.</p>
01/02/2013	<p>Após uma semana de chuvas intensas, foram observadas trincas na área de recirculação conforme apresentado nas Figuras 10-1 e 10-2. Estas evidenciaram mais um processo de ruptura do solo superficial. Não foi registrado escorregamento de RSU/solo.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="411 734 890 1339">  <p>01 02 2013</p> </div> <div data-bbox="943 734 1455 1339">  <p>01 02 2013</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div data-bbox="411 1375 651 1451"> <p>Figura 10-1 – Trincas. Fonte: A autora.</p> </div> <div data-bbox="943 1375 1182 1451"> <p>Figura 10-2 – Trincas. Fonte: A autora.</p> </div> </div>
26/04/2013	<p>Foi observado que o talude da macrocélula voltado para Rua Sucupira estava com trincas de diversos tamanhos em toda a sua extensão, conforme apresentado nas Figuras 10-3 e 10-4. Estas trincas apontavam para uma situação limite na estabilidade do solo de cobertura, em princípio sem envolver a massa de RSU. As trincas foram observadas paralelas ao topo do talude e seguindo a linha de injeção de chorume.</p>

10.1. Acompanhamento de campo – registro das intercorrências.

Data	Evento
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Figura 10-3 – Trincas. Fonte: A autora.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Figura 10-4 – Trincas. Fonte: A autora.</p> </div> </div> <p>Procedeu-se com monitoramento através de novos MS (conforme Figuras 10-5 e 10-6) durante um mês, constatando-se que estas trincas foram causadas pela infiltração de chorume, que acabou levando o solo de cobertura em um caso de retroerosão (erosão regressiva), que tem início em um ponto de emergência d'água e progride para montante, carreando os sedimentos das camadas internas do solo pela ação do escoamento subsuperficial e formando espaços vazios interligados, denominados tubos de erosão ou processo de “<i>piping</i>”.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Figura 10-5 – Trincas. Fonte: A autora.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Figura 10-6 – Trincas. Fonte: A autora.</p> </div> </div>

10.1. Acompanhamento de campo – registro das intercorrências.

Data	Evento
15/07/2013 a 24/08/2013	O sistema foi interrompido em função de mudanças estruturais no ASMC em função da necessidade de abertura de uma nova célula de disposição de RSU. O sistema de recirculação passou por uma alteração na sua estrutura física, onde a alimentação do sistema passou a ser a bacia de contenção de chorume envelopada, uma vez que as bacias gêmeas deixaram de existir.

