



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Alessandra Martins Avelino de Amorim

**AVALIAÇÃO DE RECALQUES NA CÉLULA 2 DO ATERRO SANITÁRIO DE
CAMPINA GRANDE - PB**

RECIFE

2018

ALESSANDRA MARTINS AVELINO DE AMORIM

**AVALIAÇÃO DE RECALQUES NA CÉLULA 2 DO ATERRO SANITÁRIO DE
CAMPINA GRANDE - PB**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito necessário para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.
Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Coorientadora: Prof^ª. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro.

RECIFE

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Amorim, Alessandra Marins Avelino de.

Avaliação de Recalque na Célula 2 do Aterro Sanitário de Campina Grande -
PB / Alessandra Marins Avelino de Amorim. - Recife, 2018.

84 : il., tab.

Orientador(a): José Fernando Thomé Jucá

Coorientador(a): Vesruschka Escarião Dessoles Monteiro

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de
Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
2018.

Inclui referências, apêndices.

1. Recalques em Aterro Sanitário. 2. Monitoramento dos Recalques por
Leituras Topográficas. 3. Fatores que Influenciam o Recalque do Aterro
Sanitário. I. Jucá, José Fernando Thomé. (Orientação). II. Monteiro,
Vesruschka Escarião Dessoles. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DE RECALQUES NA CÉLULA 2 DO ATERRO SANITÁRIO DE
CAMPINA GRANDE - PB**

defendida por

Alessandra Martins Avelino de Amorim

Considera a candidata APROVADA

Recife, 15 de março de 2018

Orientador - Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá – UFPE
Coorientadora – Prof.^a Dr.^a Veruschka Escarião Dessoles Monteiro - UFCG

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá – UFPE
(orientador)

Prof.^a Dr.^a Maria Odete Holanda Mariano – UFPE
(examinadora externa)

Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira – UFPE
(examinador interno)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me sustentado e capacitado intelectualmente na construção deste trabalho.

Aos meus pais, Tarcizio Inácio Avelino e Carmelita Martins Avelino, por ter me ensinado, o valor da persistência, para superar todos os obstáculos que a vida oferece.

Ao meu esposo, Alex Costa de Amorim, que tem sido um parceiro de sonhos e a meus filhos, Natan, Ana Luiza e Renan, por serem os agentes motivadores do meu desenvolvimento.

Ao Professor e orientador, José Fernando Thomé Jucá, pela confiança, incentivo e apoio decisivo para continuidade e o término do meu trabalho.

A Professora Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, por ter me acolhido em seu grupo e dado a oportunidade de trabalhar nesta pesquisa.

Ao Prof. William de Paiva e o professor Márcio Camargo de Melo, pela contribuição e dedicação para ensinar e treinar o Grupo de Gestão Ambiental (GGA).

Ao Grupo GGA que esteve presente em todo o período desta pesquisa na contribuição da coleta dos dados necessários da pesquisa.

A Andréa e sua Equipe da secretaria da pós-graduação, pelo apoio e dedicação aos alunos da pós-graduação em engenharia Civil da UFPE.

Ao Engenheiro João Azevedo da ECOSSOLO, por ter contribuído com sua experiência e gentileza de fornecer todas as informações pertinentes a construção deste trabalho.

RESUMO

O destino e o tratamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) tem sido motivo de atenção devido as exigências de conservação e proteção ambiental. A disposição final dos RSU em aterros Sanitários ainda é considerada uma solução técnica, econômica e ambientalmente segura. A natureza dos materiais depositados nos aterros sanitários é muito complexa devido a sua heterogeneidade, dimensão das partículas e a perda de massa por biodegradação dos resíduos e cargas impostas. Um dos indicadores que melhor expressa o comportamento dos resíduos em aterros sanitários ao longo do tempo é o recalque, que corresponde a redução de volume e massa dos resíduos aterrados. O presente trabalho tem como objetivo analisar os recalques da célula 2 do aterro sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos de Campina Grande/PB. Os recalques da Célula 2 do Aterro Sanitário, foram medidos por meio do monitoramento topográfico de placas e marcos distribuídos na superfície da Célula. Leituras de concentrações de gases foram realizadas durante o período de monitoramento da célula 2 para compreender a fase em que se encontra o estado de decomposição da célula. Na célula 2 do aterro Sanitário foram verificadas deformações que variaram de 1,7% a 4% ao longo de 1 ano de monitoramento. Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o total de precipitação acumulada durante o período de monitoramento foi de 564,3 mm, que se encontra abaixo do volume anual de 764,3 mm de precipitação acumulada, indicando um período de precipitação reduzida, logo as condições climáticas não apresentaram alterações nos resultados dos recalques ao longo do período monitorado. Segundo os dados das concentrações de gases, observa-se um ambiente adequado para a proliferação de bactérias responsáveis pela produção do metano, indicando, também, características de uma fase metanogênica, marcada pela intensa atividade biodegradante. A intensa produção do metano e as deformações lentas são características de uma compressão secundária, fase de maior duração em um aterro sanitário. Então os resultados dos recalques indicam que o Aterro Sanitário de Campina Grande/PB, ainda sofrerá deformações por um longo período de tempo até sua estabilização.

Palavras-chave: Resíduos sólidos; aterro sanitário; monitoramento; recalque.

ABSTRACT

The destination and treatment of Urban Solid Waste (USW) has been a reason for attention due to the conservation and environmental protection requirements. The final disposal of USW in landfills is still considered a technical, economical and environmentally safe solution. The nature of the materials deposited in the landfills is very complex due to its heterogeneity, particle size and the loss of mass by biodegradation of the residues and imposed loads. One of the indicators that best expresses the behavior of the residues in sanitary landfills over time is the repression, which corresponds to the reduction of volume and mass of the landfill wastes. The present work has as objective to analyze the settlements of cell 2 of the sanitary landfill of Urban Solid Waste of Campina Grande / PB. The settlements of Cell 2 of Landfill were measured by topographic monitoring of plates and landmarks distributed on the surface of the Cell. Gas concentration readings were performed during the monitoring period of cell 2 to understand the stage in which the decomposition state of the cell is found. In cell 2 of the Sanitary landfill, deformations ranging from 1.7% to 4% were verified over 1 year of monitoring. According to data from the National Institute of Meteorology (INMET), total accumulated rainfall during the monitoring period was 564.3 mm, which is below the annual volume of 764.3 mm of accumulated precipitation, indicating a period of reduced precipitation, thus the climatic conditions did not show changes in the repression during the monitored period. According to the gas concentration data, a suitable environment for the proliferation of bacteria responsible for the production of methane is observed, indicating a methanogenic phase, marked by the intense biodegradation activity. The intense production of methane and the slow deformations point to a methanogenic phase and a secondary compression. Then the results of the settlements indicate that the Landfill Campina Grande / PB, will still suffer deformations for a long period of time until its stabilization.

Keywords: Solid waste; landfill; monitoring; settlement;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Vazadouro a céu aberto (lixão)	18
Figura 2. Disposição final de RSU por região em 2016.....	20
Figura 3. Instalação de geossintéticos para a impermeabilização de um aterro sanitário na cidade de São Paulo (SP).....	21
Figura 4. Sistema de drenagem do aterro de Aparecida de Goiânia-GO.	22
Figura 5. Esquema de um sistema de drenagem interna dos líquidos de um Aterro Sanitário.....	22
Figura 6. Detalhe do dreno de captação de gases de um aterro sanitário.	23
Figura 7. Curva teórica de compressibilidade do RSU.	25
Figura 8. Percentual de cada tipo de resíduo no município de Campina Grande/PB.....	29
Figura 9. Fases da decomposição dos resíduos com subprodutos gerados e intervalo de duração.....	35
Figura 10. (a) Marco topográfico e (b) Equipamento utilizado na leitura dos marcos ..	38
Figura 11. Placa superficial para monitoramento de recalques superficiais.....	38
Figura 12. Mapa de localização do município de Campina Grande/PB.....	42
Figura 13. Localização do Aterro Sanitário de Campina Grande/PB.....	43
Figura 14. Célula 2 do Aterro Sanitário de Campina Grande/PB.	44
Figura 15. Série de peneira para fração grossa e peneiramento sob agitação mecânica. 46	
Figura 16. Série de peneiras circulares utilizadas no peneiramento da fração fina.....	47
Figura 17. Distribuição dos pontos de monitoramento superficiais da célula de RSU. .	48
Figura 18. Equipamento utilizado na leitura dos deslocamentos (a); Marco topográfico (b); placa de Recalque (c).....	49
Figura 19. Dreno vertical de gás (metros).	50
Figura 20. Posicionamento dos drenos verticais da célula 2.	50
Figura 21. Monitoramento da concentração dos gases nos drenos com o uso do Dräger	51
Figura 22. Distribuição Granulométrica dos RSU depositados no Aterro Sanitário de Campina Grande/PB.....	53
Figura 23. Faixa de Distribuição das dimensões de partículas.....	54
Figura 24. Posicionamento dos marcos M-15, M-16, M-17, M-18, M-19, M20 e M-21	56
Figura 25. Corte longitudinal AA' da célula 2 (1ªcamada).	57
Figura 26. Recalques medidos ao longo do tempo.....	57
Figura 27. Deformação Específica da Primeira Camada.....	58
Figura 28. Velocidade dos deslocamentos verticais dos marcos superficiais	58
Figura 29. Posicionamento dos marcos superficiais distribuídos na célula 2	60
Figura 30. Corte longitudinal AA' da célula 2 (camada 2).	60
Figura 31. Recalques medidos por meio do monitoramento dos marcos superficiais. ..	61
Figura 32. Deformação Específica da Segunda Camada.....	61
Figura 33. Velocidade dos Recalque monitorados	62
Figura 34. Posicionamento dos marcos superficiais M-1, M-2, M-3, M-4 e M-24.	63
Figura 35. Corte longitudinal AA' da célula 2 (camada 3)	64
Figura 36. Deslocamentos verticais monitorados por meio dos marcos M-1, M-2, M-3, M-4 e M-24.....	64

Figura 37. Deformação específica nos Marcos localizados na 3ª Camada.	65
Figura 38. Velocidade dos Deslocamentos Verticais Monitorados na 3ª Camada.....	65
Figura 39. Recalque dos RSU monitorados por meio das Placas Metálicas	66
Figura 40. Deformação Específica Monitoradas por Placas de Recalque.....	67
Figura 41. Espessura inicial, Espessura final e Deformação específica da célula 2.....	68
Figura 42. Curvas de isorecalques na célula 2 (dados em metro)	69
Figura 43. Concentração de gases nos drenos da Célula 2.....	70
Figura 44. Velocidade dos Recalques Monitorados por meio de Placas de Recalque ...	71
Figura 45. Quantidade de chuvas no período do monitoramento.....	73

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Destino dos Resíduos Sólidos, por unidade de destino.	19
Tabela 2. Recalque em maciço sanitário.	24
Tabela 3. Perfil quantitativo dos RSU gerados em alguns países	28
Tabela 4. Os Pesos específicos dos RSU da Literatura	31
Tabela 5. Fases da decomposição dos resíduos.	35
Tabela 6. Movimento de massa para maciços de solo.....	39
Tabela 7. Critérios para velocidades de deslocamento para aterros sanitários.....	39
Tabela 8. Valores mínimos e máximos do histórico de dados do Aterro Sanitário Bandeirantes	39
Tabela 9. Critérios para velocidades de deslocamento no aterro CDR Pedreira.	40
Tabela 10. Velocidades de deslocamentos verticais e horizontais em aterros sanitários após encerrados.....	40
Tabela 11. Coordenadas de localização do Aterro sanitário de Campina Grande/PB. ..	43
Tabela 12. Composição dos RSU de Campina Grande/PB.	45
Tabela 13. Peso do RSU depositado na célula 2 e o Volume.....	55
Tabela 14. Espessuras dos Pontos Monitorados na 1ª Camada da Célula 2.....	57
Tabela 15. Características físico-químicas dos resíduos sólidos urbanos da célula 2....	59
Tabela 16. Espessuras dos Pontos Monitorados na 2ª Camada da Célula 2.....	61
Tabela 17. Espessuras dos Pontos Monitorados na 3ª Camada da Célula 2.....	64
Tabela 18. Espessuras dos Pontos Monitorados por meio de placas metálicas.....	67

LISTA DE SIGLAS

ABNT	-Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	-Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AESA	-Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
CDR	-Centro de Disposição de Resíduos
CONAMA	-Conselho Nacional do Meio Ambiente
DEFRA	<i>Department for Environment Food & Rural Affairs.</i>
DG	-Dreno de gás
GGA	-Grupo de Geotecnia Ambiental
GPS	-Global Positioning System
GCL	<i>-Geosynthetic Clay Liner</i>
CCL	<i>- Compacted clay liner</i>
IBGE	-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMA	-Instituto do Meio Ambiente
INMET	-Instituto Nacional de Meteorologia
NBR	-Norma Brasileira
M_R	-Massa retida;
M_{TS}	-Massa total seca;
PB	-Paraíba
PEAD	-Polietileno de alta densidade).
pH	-Potencial hidrogeniônico
PMGIRS	-Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNRS	-Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	-Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
P_p	-Porcentagem que passa no peneiramento grosso
P_R	-Porcentagem retida no peneiramento grosso;
PR	- Placa de Recalque
RE	-Recalques específicos
RSU	-Resíduos Sólidos Urbanos
SEPLAN	-Secretaria de Planejamento
UFPE	-Universidade Federal de Pernambuco
UFCG	-Universidade Federal de Campina Grande
VDH	-Velocidade de deslocamento horizontal

VR	-Velocidade de recalques
ΔH	-Variação da altura
ϵ_0	-Deformação específica;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivo Geral.....	15
1.2. Objetivos Específicos:.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. Resíduos Sólidos	16
2.1.1. Disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos	17
2.2. Aterros Sanitários	20
2.3. Recalques em Aterro Sanitário.....	24
2.4. Mecanismo responsáveis pelos recalques	26
2.5. Fatores que influenciam os Mecanismos responsáveis pelos recalques	27
2.5.1. Composição dos resíduos;.....	28
2.5.2. Altura do aterro;.....	29
2.5.3. Eficiência do sistema de drenagem	30
2.5.4. Peso específico inicial;	30
2.5.5. Idade do aterro;	31
2.5.6. Fatores ambientais (umidade, temperatura e condições climáticas) .	32
2.5.7. A decomposição da matéria orgânica	33
2.6. Monitoramento dos gases	34
2.7. Monitoramento dos Deslocamentos de Aterro Sanitário	37
2.8. Critério de Avaliação dos Recalques.....	38
3. METODOLOGIA	41
3.1. Área de Estudo	41
3.2. Caracterização dos RSU.....	44
3.2.1. Composição gravimétrica	45
3.2.2. Granulometria	45
3.2.3. Peso específico	48
3.3. Monitoramento dos deslocamentos	48
3.4. Monitoramento das Concentrações de Gases.....	50
3.5. Condições Climáticas.....	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1. Características dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	53
4.1.1. Granulometria	53
4.1.2. Peso Específico	55

4.2. Monitoramento dos Deslocamentos Verticais	55
4.2.1. Monitoramento dos Marcos Superficiais	56
4.2.2. Monitoramento das Placas de Recalques	66
4.3. Análise das concentrações dos gases	70
4.4. Influência do Clima nos Recalques	72
5. Conclusões.....	74

1. INTRODUÇÃO

A sistemática de gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), por parte de alguns municípios do Brasil ainda se mostram deficientes, pois segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais ABRELPE (2016), apenas 35% dos RSU coletados no Nordeste são depositados em Aterros Sanitários, os demais seguem para locais inadequados, sendo motivo de atenção devido às exigências de conservação. Esta demanda tem exigido do poder público providências para resolver as questões relacionadas ao local destes aterros. Para Lino (2007), os locais favoráveis para a implantação de um aterro devem, além de promover a proteção ao ambiente e à saúde pública, proporcionar economia em todo o processo de implantação e operação do aterro sanitário.

Para que não haja um esgotamento de capacidade de locais adequados, muitos projetos já preveem o alteamento dos aterros sanitários, a exemplo das grandes metrópoles que já utilizam essa prática, e em consequência disso, muitos estudos geotécnicos têm sido necessários para que se garantam as condições de segurança destes aterros.

Segundo Araújo Neto (2016), os aterros sanitários são obras de engenharia de alta complexidade, devido, principalmente, à natureza heterogênea do material, às variadas dimensões de suas partículas e à perda de massa sólida durante a biodegradação. O Recalque é um dos indicadores que melhor expressa o comportamento dos resíduos ao longo do tempo, em aterros sanitários. Os recalques correspondem aos deslocamentos verticais descendentes da superfície do aterro provocados pelas cargas externas, peso próprio dos RSU e biodegradação desses resíduos.

Para Melo (2011) os recalques em RSU acontecem após os vazios existentes no interior da massa de resíduos não suportarem o peso a eles impostos. Para Melo et. al (2014), tanto os recalques superficiais como os em profundidade ocorreram continuamente durante um determinado tempo, e após este período tinha-se recalques zero. Estes períodos de recalques zero, assim chamados por Melo (2003) e McDougall et al. (2004), se dão por aumento de vazios com intensa atividade biológica.

O entendimento da magnitude dos recalques em aterros sanitários auxilia a um adequado gerenciamento integrado dos resíduos, pois pode proporcionar, através da diminuição da massa do RSU, uma maior capacidade de disposição de RSU.

Tendo em vista que a degradação biológica diminui o volume do aterro, faz necessário analisar os fatores que contribuem para os recalques ao longo do tempo, como também monitorar tais eventos, afim de proporcionar uma maior segurança em sua operacionalidade. O monitoramento dos deslocamentos verticais de um aterro em escala real proporciona informações para servir de base para outros aterros localizados em regiões com características parecidas, uma vez que, não há referência normativa para estabelecer um padrão de comportamento.

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento dos recalques da célula 2 do aterro sanitário de Campina grande através do monitoramento dos deslocamentos verticais ocorridos ao longo do tempo.

1.1.Objetivo Geral

Avaliar o comportamento dos recalques da célula 2 do aterro sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos, de campina Grande/PB, por meio do monitoramento dos deslocamentos ocorridos ao longo de 1 ano.

1.2.Objetivos Específicos:

- quantificar os recalques ocorridas, na célula 2 do aterro sanitário a partir do monitoramento dos deslocamentos verticais, medidos por meio de leituras topográficas nos pontos referenciados por marcos e placas de recalques superficiais instalados na célula 2 e comparar com dados encontrados na bibliografia técnica;
- analisar o comportamento dos deslocamentos em relação a qualidade do gás que está sendo produzida no interior do maciço sanitário durante todo o período de monitoramento;
- verificar se as condições climáticas da região interferem nos resultados dos recalques monitorado da célula 2;
- identificar a influência que o comportamento mecânico e a biodegradação têm em relação aos recalques ocorridos durante o período de monitorado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os principais assuntos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, com o intuito de facilitar sua compreensão. São englobadas as principais definições inerentes à disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos, os fatores que influenciam os recalques em uma célula de aterro sanitário, monitoramentos dos deslocamentos verticais e os critérios de avaliação, como também o monitoramento de gases e as fases de degradação dos resíduos urbanos responsáveis pelos recalques.

2.1. Resíduos Sólidos

Os resíduos sólidos são os resultados das atividades humanas, ou seja, é qualquer material descartado, que não passa pelo processo da reutilização, resultante das atividades industriais (de uma forma geral) e domésticas, dos serviços públicos, atividades hospitalares, da mineração, dos lodos de estação de tratamento de água e esgoto, estabelecimentos comerciais, logradouros públicos, resíduos de ruas e praças.

BOSCOV (2008) define os Resíduos sólidos como qualquer matéria que é descartada ou abandonada ao longo de atividades industriais, comerciais, domésticas ou outras; ou ainda, como produtos secundários para os quais não há demanda econômica e para os quais é necessária disposição.

A Lei 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, em seu Art. 3º, sexagésimo item, define os resíduos sólidos como material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Segundo a norma brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004), os Resíduos sólidos Urbanos são definidos como resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de

tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Os resíduos sólidos podem ser classificados de várias formas, quanto a sua periculosidade, quanto a sua natureza física como também quanto a sua composição química. Na literatura são mostradas diversas propostas para a classificação de resíduos sólidos. A resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 1993), classifica os resíduos em quatro classes, de acordo com o risco oferecido a saúde pública, já Nascimento (2007), classificou os resíduos com base em sua degradabilidade. A norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica tais resíduos de acordo com os processos envolvidos na origem dos mesmos, na caracterização de seus constituintes e na identificação dos possíveis impactos da saúde e ao meio ambiente. Schalch et al. (2002), classifica o resíduo sólido com base na sua origem.

2.1.1. Disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos

O gerenciamento dos resíduos sólidos envolve várias etapas e a disposição final é a última deste processo. Em todo o país, os RSU eram dispostos em lixões a céu aberto, sem qualquer tipo de controle ou proteção ambiental, causando a proliferação de vetores de doenças, a contaminação dos solos, das águas superficiais e subterrâneas, além de problemas sociais relacionados a pessoas (catadores) que passaram a viver em função do resíduo depositado nesses locais, e que, algumas vezes, residem no próprio local (VILHENA, 2010).

A forma incorreta de disposição final dos RSU pode causar graves problemas de poluição ambiental e de saúde pública, pois o “LIXO” é um fator indireto de transmissão de doenças, por meio da ação de vetores (insetos e roedores), que encontram no lixo alimento e condições adequadas para sua proliferação.

Para o destino dos RSU existe basicamente três formas de disposição final no solo, sendo duas inadequadas (vazadouros a céu aberto e aterros controlados) e uma adequada (aterros sanitários).

O vazadouro a céu aberto, mais conhecido como Lixão, é uma forma de depósito de resíduos sólidos urbanos em um meio aberto sem critérios de segurança quanto a contaminações, gerando impacto ambiental e danos à saúde pública. Por não possuírem

um conjunto de sistemas necessários que protejam o meio ambiente de contaminações, os lixões são considerados meios inadequados a disposição de RSU.

Segundo definição da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico PNSB (2008), vazadouros a céu aberto é o Local utilizado para disposição do lixo, em bruto, sobre o terreno, sem qualquer cuidado ou técnica especial. O vazadouro a céu aberto caracteriza-se pela falta de medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública (Figura 1).

Figura 1. Vazadouro a céu aberto (lixão)



Fonte: Instituto do Meio Ambiente - IMA (2016)

Aterros controlados tem a mesma definição de Lixão a céu aberto, a única diferença é que os mesmos passam por um processo de recuperação sem prejudicar seu funcionamento.

O processo de recuperação se dá através de medidas de isolamentos da área para impedir a operação de catadores, como também são realizadas controle de qualidade dos resíduos recebidos no local, operação de recobrimento rotineiro/diário da massa de lixo e projetos para a drenagem de líquidos percolados e gases.

Os Aterros Sanitários Segundo a PNSB (2008) é o destino final dos resíduos sólidos urbanos através de sua adequada disposição no solo, sob controles técnico e operacional permanentes, de modo a que nem os resíduos, nem seus efluentes líquidos e gasosos, venham a causar danos à saúde pública e/ou ao meio ambiente. Para tanto, o aterro sanitário deverá ser localizado, projetado, instalado, operado e monitorado em conformidade com a legislação ambiental vigente e com as normas técnicas oficiais que regem essa matéria. Este método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível,

cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário. Conta com impermeabilização de base e sistemas de coleta e tratamento de biogás e do líquido percolado.

Em 2010 o governo federal aprovou uma lei 12.305/2010 que obriga todas as cidades do país a desativarem os lixões e construírem aterros sanitários para receber o lixo produzido pela população, porém segundo a ABRELPE (2016), 59,8% dos municípios brasileiros ainda fazem uso de unidades de destinação inadequada de resíduos, encaminhando-os para lixões e aterros controlados, que pouco se diferenciam dos lixões, uma vez que ambos não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações.

Uma Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB, 2008) revelou que em 2008, a destinação final de 50,8% dos resíduos sólidos, no Brasil, segue para os vazadouros a céu aberto (lixões). Na Tabela 1 observa-se o histórico do destino dado aos RSU ao longo dos anos, ou seja, no Brasil houve um aumento no uso de aterro sanitário. Porém ainda são necessárias medidas mais rigorosas para estes números atenderem as condições esperadas a um cenário adequado.

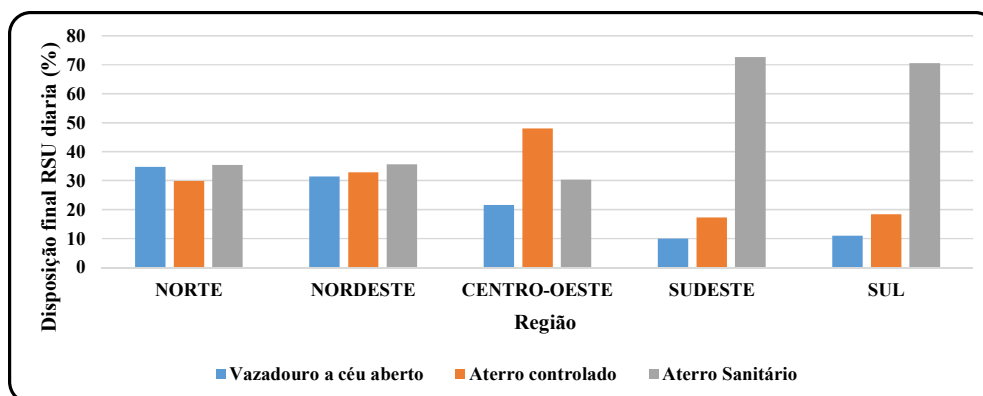
Tabela 1: Destino dos Resíduos Sólidos, por unidade de destino.

Ano	Destino final do Resíduos Sólidos, por unidade de destino dos destino do resíduos (%)		
	Vazadouro a céu aberto	Aterro controlado	Aterro Sanitário
1989	88,2	9,6	1,1
2000	72,3	22,3	17,3
2008	50,8	22,5	27,7
2009	19,3	23,9	56,8
2010	18,1	24,3	57,6
2015	17,2	24,1	58,7
2016	17,4	24,2	58,4

Fonte: IBGE, (2008); ABREPEL (2009 e 2010); ABREPEL (2016).

No decorrer dos anos o país teve um crescimento significativo quanto ao destino dos resíduos em aterros sanitário. Segundo pesquisa da ABREPEL (2016), o Brasil teve um aumento no uso de aterros sanitário como destino final de RSU, porém as pesquisas, também revelam que o aumento do uso de aterro sanitário concentra-se na Região Sul e Sudeste do país, nas outras regiões o destino final de resíduo sólido ainda é maior em lixões e em aterros controlados. A Figura 2 ilustra o destino diário dos RSU nas regiões do país:

Figura 2. Disposição final de RSU por região em 2016



Fonte: Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – ABRELPE (2016).

Todos os resíduos devem ser dispostos de maneira adequada, ou seja, de forma que não cause impactos as pessoas nem ao meio ambiente. A disposição em aterros é a forma de destinação de resíduo sólido e semissólido mais utilizada em todo o mundo.

2.2. Aterros Sanitários

Segundo a NBR 8419 (ABNT 1996), aterro sanitário de RSU é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

O método mais utilizado, mundialmente, para disposição de resíduo sólido é o aterro sanitário, uma técnica que busca minimizar o potencial de contaminação gerado pela produção de “LIXO”. Atualmente existem várias técnicas voltadas para a eliminação dos RSU, como a exemplo da reciclagem, compostagem e a incineração, dentre outros. Porém, com todas estas opções tecnológicas já conhecidas para a eliminação dos resíduos, existem também aqueles que são difíceis de serem eliminados, sendo necessário seu confinamento em aterros controlados. No Brasil, poucos municípios se utilizam de técnicas de reutilização do resíduo sólidos, sendo o aterro sanitário o meio mais usado para a disposição do resíduo sólido. Consequentemente, a maioria dos Aterros sanitários recebem um elevado volume de resíduo, com todo tipo de “LIXO”.

Devido ao potencial de poluição dos resíduos sólidos urbanos ao meio ambiente, os aterros sanitários requerem técnicas para evitar ou minimizar os seguintes riscos (PALMA, 1995):

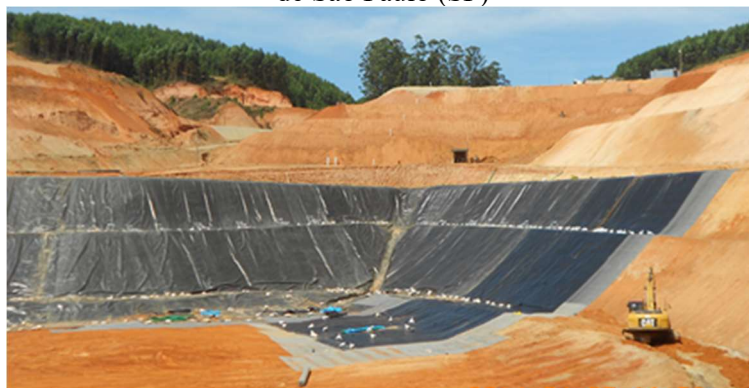
- Contaminação das águas superficiais e subterrâneas;
- Formação de pó e arraste de resíduos leves;
- Propagação de gases tóxicos ou mal cheirosos;
- Acesso de animais ou pessoas não autorizadas ao aterro;
- Iniciação e propagação de incêndios;
- Impactos visuais desagradáveis.

Algumas técnicas especiais devem ser tomadas durante a execução dos aterros sanitários para evitar todos problemas citados anteriormente. Os componentes básicos para instalação de um aterro são:

a) Tratamento da base do aterro

O tratamento da base de um Aterro tem como função principal proteger e impermeabilizar a fundação do Aterro, evitando a contaminação do subsolo e aquíferos adjacentes devido à migração dos lixiviados e gases. Segundo BOSCOV (2008), O sistema de tratamento utilizado para impermeabilização da fundação do aterro é o de solo compactado (*compacted clay liner* ou CCL), geossintéticos (geomembranas-GM, ou geocomposto argiloso para barreira impermeável - *Geosynthetic Clay Liner* GCL) ou, mais usualmente, uma combinação destas. A Figura 3 exemplifica um sistema de impermeabilização do fundo da base do aterro.

Figura 3. Instalação de geossintéticos para a impermeabilização de um aterro sanitário na cidade de São Paulo (SP)



Fonte: PEDRONI (2015)

b) Sistema de drenagem dos líquidos percolados

A principal função do sistema de drenagem de um aterro sanitário é coletar e conduzir os líquidos percolados através de drenos internos, para que se reduzam as pressões atuantes nos líquidos da massa dos resíduos aterrados. Segundo Teixeira (2015), este sistema consiste em uma camada de material granular de alta permeabilidade, como brita, protegida por uma camada de filtração, geralmente de areia ou geotêxtil. Dentro da camada de material granular é colocada uma tubulação perfurada, de material física e quimicamente resistente ao tipo de resíduo disposto, como por exemplo, PEAD (polietileno de alta densidade).

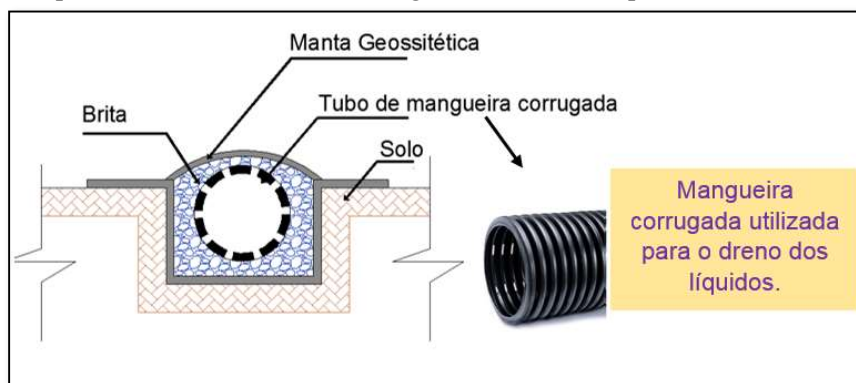
As tubulações conduzem o percolato a um reservatório ou trincheira, de onde é removido por bombeamento para tratamento (TAPAHUASCO, 2009). As Figuras 4 e 5 mostram a disposição de um sistema de drenos para líquidos percolados numa célula de aterro sanitário.

Figura 4. Sistema de drenagem do aterro de Aparecida de Goiânia-GO.



Fonte: ANTUNES (2017)

Figura 5. Esquema de um sistema de drenagem interna dos líquidos de um Aterro Sanitário.



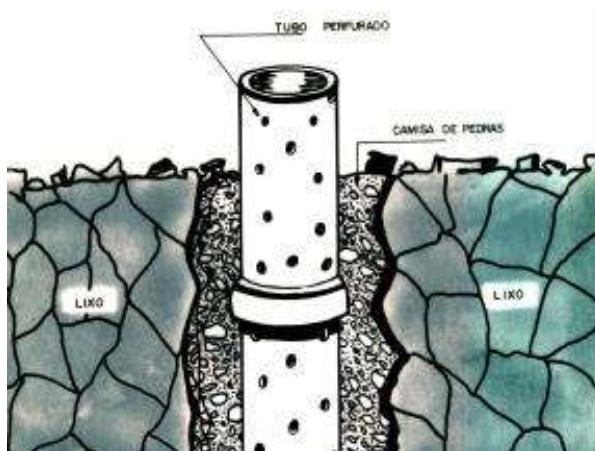
c) Sistema de drenagem de gases

Um dos principais objetivos de um sistema de drenagem de gás é controlar a geração e migração do gás e com isso possibilitar uma melhor estimativa do potencial energético dos aterros sanitários.

O biogás é formado a partir da degradação anaeróbia de resíduos orgânicos e composto por uma mistura de gases, como metano, gás carbônico, e em menor quantidade, hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis (PECORA et al., 2008).

O sistema de drenagem de gases de um aterro sanitário compreende drenos verticais e camadas horizontais interligados. As camadas horizontais fazem parte da cobertura e podem ser constituídas de areia, geotêxteis espessos, geomalhas e geocompostos para drenagem. Os drenos verticais (Figura 6) atravessam todo o perfil do aterro, desde o revestimento de fundo até a superfície do aterro, e são construídos com tubos de concreto verticais perfurados envoltos por materiais granulares (BOSCOV, 2008).

Figura 6. Detalhe do dreno de captação de gases de um aterro sanitário.



Fonte: Schalch *et al.* (2002)

d) Camadas de coberturas adequadas

De acordo com Catapreta (2008), as principais funções da camada de cobertura final de aterros sanitário são: controlar a entrada de água e ar do aterro; minimizar a migração dos gases para fora do aterro; servir como elemento de redução de odor, vetores de doença e outros inconvenientes; servir como sistema de controle de águas superficiais e; facilitar a recomposição da paisagem. Além disso, a camada de cobertura influencia

diretamente na eficiência da decomposição bioquímica dos resíduos e no controle da migração de gás para a atmosfera (FERREIRA E MAHLER, 2006). Existem vários métodos construtivos da camada de cobertura, sendo que a utilização de solos compactados com baixa condutividade hidráulica é o mais empregado (HUSE, 2007).

2.3. Recalques em Aterro Sanitário

Os recalques podem ser definidos como os deslocamentos verticais que ocorrem no aterro sanitário. A quantificação de deformabilidade das massas de “lixo” auxilia num importante aspecto do gerenciamento dos resíduos sólidos, que é a melhoria das estimativas de vida útil dos aterros sanitários, uma vez que permite calcular a capacidade volumétrica adicional de armazenamento que os recalques geram.

Na literatura pode-se observar alguns valores de recalque em relação à espessura total inicial dos aterros sanitários, deste modo, a porcentagem da deformação varia bastante e pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2. Recalque em maciço sanitário.

Autor	Recalque Relativo á Espessura Inicial
Sowers (1973)	Da ordem de 30%
Wall e Zeiss (1995)	Entre 25% e 50%
Van Meerten et al. (1995)	Entre 10% e 25%
Coumoulos e Koryalos (1997)	Entre 20% e 25%
Ling et al. (1998)	Entre 30% e 40%
Abreu (2000)	Entre 10% e 30%

Fonte: TEIXEIRA (2015).

O recalque final dos resíduos apresenta-se como um valor de difícil avaliação, sendo composto por um recalque inicial, observado em um curto período de tempo após a construção do aterro, e por um secundário, que ocorre ao longo de um período de tempo significativo. A taxa de recalques diminui com o tempo e com o aumento da profundidade do resíduo em relação à superfície do aterro (MARQUES, 2001).

Diversos tipos de materiais são depositados em aterros sanitários e a maioria deles são materiais altamente deformáveis, trata-se de materiais que ao longo do tempo,

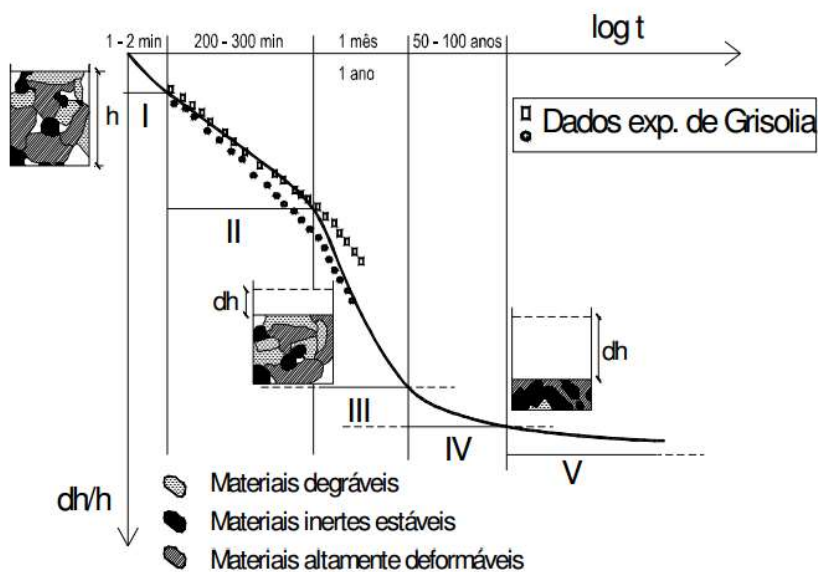
quando submetido a cargas constantes, podem apresentar grandes deformações. Aterros sanitários apresentam recalques muito elevados se comparados com os recalques dos maciços de solo. Para Boscov (2008), a compressão de maciços sanitários resulta do carregamento e de alterações dos materiais componentes dos RSU.

Segundo Boscov (2008), o recalque de maciço sanitário, independentemente dos mecanismos que o causam, é dividido em três fases ao longo do tempo, à semelhança de solos:

- Compressão inicial: corresponde ao recalque que ocorre quando uma carga externa é aplicada ao maciço sanitário, e provoca imediata redução dos vazios entre partículas e das próprias partículas;
- Compressão primária: corresponde ao recalque causado pela dissipação das pressões neutras ou poropressões nos vazios, geralmente dentro de trinta dias após a aplicação de carga;
- Compressão secundária: correspondente ao *creep* e à degradação biológica, pode durar décadas e é responsável pela maior parcela dos recalques dos aterros sanitários.

GRISOLIA & NAPOLEONI (1996) propuseram uma curva teórica de compressibilidade dos RSU subdividida em fases, capaz de explicar os mecanismos controladores do recalque em depósitos de RSU, como apresentado na Figura 7.

Figura 7. Curva teórica de compressibilidade do RSU.



Fonte: GRISOLIA & NAPOLEONI, 1996.

As fases representadas podem assim ser descritas:

- Fase I – Deformação inicial, redução da macroporosidade;
- Fase II – Recalque residual dos materiais altamente deformáveis;
- Fase III – Deformação lenta e decomposição da matéria orgânica;
- Fase IV – Deformação concluída;
- Fase V – Deformação residual.

GRISOLIA & NAPOLEONI (1996) defendem ainda que os depósitos de RSU recalcam cerca de 10 a 30% somente sob a ação de seu peso próprio, e que cerca de 90% dos recalques totais esperados ocorrem nos dez primeiros anos após o fechamento do aterro.

Quando se fala de recalques em aterros costuma-se pensar que eles ocorrem separadamente como acontece em solos. Entretanto, afirmar que recalques primários acontecem separadamente dos secundários poderia ser bastante comprometedor, já que no momento que se dispõem o lixo em aterros, grupos de microrganismos (bactérias aeróbias e anaeróbios, fungos, protozoários e vírus) começam a degradar biologicamente os resíduos, conseqüentemente, é difícil diferenciar quando exatamente está acontecendo recalques primários ou secundários, ou seja, ambos ocorrem durante a vida útil do aterro (MELO, 2003).

2.4.Mecanismo responsáveis pelos recalques

Os principais mecanismos responsáveis pelos recalques observados na massa de resíduo são causados pela ação mecânica, reorientação das partículas, transformações por reações físico-químicas e decomposição bioquímica com perda de massa na forma de gás e líquidos drenados (OLIVIER E GOURC, 2007).

Segundo Boscov (2008), os principais mecanismos responsáveis pelos deslocamentos verticais são as solicitações mecânicas, os ravinamentos internos, as alterações físico-químicas, a biodegradação, as dissipações das pressões neutras de líquidos e gases, as deformações lentas (*creep*) e as interações dos mecanismos. Desses mecanismos, somente a solicitação mecânica e a dissipação das pressões neutras estão diretamente relacionadas ao carregamento imposto, os demais dependem do ambiente em que se encontram os resíduos e das transformações bioquímicas no interior do aterro.

Os principais mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento de recalques em um sistema de contenção de RSU são:

- a. Solicitações mecânicas: se dá pelo peso próprio da massa como também da atuação da sobre carga das camadas adjacentes do aterro e da camada de cobertura causando esmagamento e quebra e rearranjo dos materiais;
- b. Ravinamentos internos: são as migrações de fragmentos, ou seja, carregamento de pequenas partículas para os espaços vazios do maciço, rearranjo das partículas;
- c. Alterações físico-químicas: causadas pela corrosão, oxidação e combustão dos materiais presente no maciço;
- d. Biodegradação: é causada pela ação de microorganismos que trabalham na decomposição dos componentes orgânicos, transferindo massa da fase sólida para a fase líquida e gasosa;
- e. Dissipações das pressões neutras de líquidos e gases; é um processo semelhante ao adensamento de solos que ocorre com a expulsão de líquidos e gases do interior do maciço do aterro sanitário;
- f. Deformações lentas (*creep*) e as interações dos mecanismos: são as deformações lentas dos componentes do resíduo causadas pela atuação das sobrecargas.

2.5.Fatores que influenciam os Mecanismos responsáveis pelos recalques

Para entender os mecanismos responsáveis pelos recalques é necessário entender também os fatores e as propriedades geotécnicas que ocorre na massa do lixo. Conforme Mariano (1999), a magnitude dos recalques é afetada por vários fatores, onde cada um influencia o outro, tornando o mecanismo de recalque muito complexo e para melhor simplifica-lo, divide os recalques em duas fases distintas, a fase física e a fase biológica, as quais não são independentes entre si. Estes mecanismos incluem perdas de finos, tanto devido ao movimento deste material para os espaços vazios, como também devido a degradação bioquímica e produção de biogás, que resultam em diminuição de volume e grandes recalques.

De acordo com Oliveira (2002), os principais fatores que influenciam nos processos de biodegradação são: granulometria, composição e idade do resíduo, umidade do resíduo, temperatura no aterro, aspectos quantitativos e qualitativos de nutrientes, pH dos líquidos presentes no aterro, densidade e grau de compactação dos resíduos.

Para Boscov (2008), os fatores que mais influencia os mecanismos de recalques é a composição dos RSU, tamanho e operação do aterro sanitário, velocidade de disposição, pré-tratamento, peso específico inicial, compactação, saturação, eficiência dos sistemas de drenagem superficial e de efluentes, flutuação dos níveis de chorume, restrições biológicas e idade do aterro.

Segue alguns dos fatores que influenciam os mecanismos de recalques em um aterro sanitário de RSU:

2.5.1. Composição dos resíduos;

A composição física ou gravimétrica tem um papel fundamental para os efeitos dos recalques, pois resíduos com quantidades de compostos orgânicos, papel e plásticos apresentaram recalques com magnitudes diferentes, dependendo da quantidade de inertes e materiais orgânicos. Segundo Melo (2003), a composição dos resíduos determina em grande parte a possibilidade da degradação biológica e influencia no teor de umidade.

A composição dos RSU, por ser muito heterogênia, também está sujeita a alguns fatores, como a situação econômica da população, estações do ano, clima, hábitos da população e, até, a legislação ambiental vigente. A Tabela 2 apresenta a composição dos resíduos de vários países.

Tabela 3. Perfil quantitativo dos RSU gerados em alguns países

País	Matéria Orgânica (%)	Papel e papelão (%)	Plástico (%)	Vidro (%)	Metal (%)	Têxteis (%)	Outros (%)
Africa do Sul ¹	31	33	7	12	7		10
Alemanha ²	44	18	5	9	3		20
Brasil ³	52,5	24,5	2,9	1,6	2,3		16,2
Canadá ¹	33,9	38,9	4,9	6,5	6,2		9,6
Espanha ¹	52	15	6	6	2,5		18,5
França ²	25	31	10	12	6	4	12
Holanda ²	52	25	8	5	4	2	5
Índia ³	78	2					20
Itália ²	47	23	7	6	3		14
Japão ¹	22,2	31,1	15,9	13,8	6,4		10,6
México ³	54,4	20	3,8	8,2	3,2		10,4
Portugal ²	60	23	4	3	4		6
Peru ³	51,4	10	3,2	1,3	2,1		32
Reino Unido ²	20	35	11	9	7	2	16
Suíça ²	30	31	15	8	6	3	7
Turquia ²	19	37	19	9	7		18
Escócia ⁵	31	24,3	11,5	6,6	7,1	5,1	17,1
U.S.A ⁴	11,4	35,7	11,1	5,5	7,9		28,4

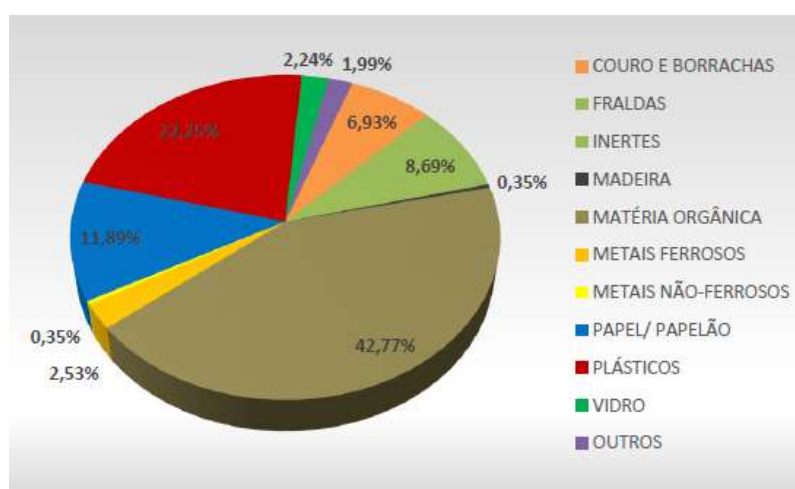
Fonte: ¹Palma (1995); ²White (1995); D'Almeida & Vilhena (2000); ⁴EPA (2003); ⁵SEPA (2004).

Fonte: Alcântara (2007)

Percebe-se que, em países subdesenvolvidos, a porcentagem de matéria orgânica é maior, enquanto nos países desenvolvidos os percentuais de papel, papelão, plásticos e metais são mais elevados. No Brasil, o teor de matéria orgânica tem um valor acima de 50%.

O Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) de Campina Grande-PB, responsável pela gestão dos resíduos sólidos urbanos, publicou em 2014 a composição gravimétrica dos RSU do município, conforme apresentada na Figura 8.

Figura 8. Percentual de cada tipo de resíduo no município de Campina Grande/PB



Fonte: ECOSAM, 2013

Segundo Araújo Neto (2016), a composição dos resíduos sólidos de Campina grande é: 46,5% de matéria orgânica, 11,1% de papel e papelão, 7,9 de têxteis sanitários, 16,7% de plástico, 2,4% de compósitos, 0,6% de metais, 2,5% de vidro e 12,4% outros.

Caracterizar os RSU quanto a sua composição gravimétrica e volumétrica auxilia no fornecimento de informações básicas para o monitoramento e com isso tornando-se uma importante ferramenta de gestão para avaliação projetos ambientais.

2.5.2. Altura do aterro;

Segundo Jucá et. al (1999), as maiores intensidades de recalques medidos ocorreram, tanto no aterro da Muribeca quanto no aterro de Aguazinha, para as Placas instaladas nos pontos de maior espessura de resíduos. A altura do aterro é um fator que aponta para as maiores intensidades de recalques devido a quantidade de matéria orgânica

degradada. Porém os recalques vão diminuir com o tempo, devido a redução da matéria orgânica do meio.

Este fato também é reforçado pelos baixos teores de sólidos voláteis e de umidade, que indicam que a atividade microbiológica está sendo finalizada e que a Célula se encontra próxima de se tornar inerte e estável (MARIANO, 1999).

2.5.3. Eficiência do sistema de drenagem

Um sistema de drenagem eficiente favorece o aumento do recalque de um aterro sanitário, pois torna eficiente a saída dos líquidos e gases, já que ocorrerá uma diminuição do volume de lixo devido ao aumento da tensão efetiva causada pelo alívio de poropressões.

Um sistema de drenagem ineficiente pode, no interior do maciço, dificultar a passagem dos líquidos e gases para o ambiente externo e provocar uma desestabilização. Para Mariano (1999), a dificuldade de se manter um sistema de drenagem eficiente ocorre devido ao fato de que os recalques ocorridos dentro do próprio aterro podem causar danos ao sistema, podendo até inutilizá-lo, já que inicialmente o sistema funciona com uma certa declividade, podendo ser danificado pela compactação e pela sobrecarga, mudando de inclinação ou sofrendo estrangulamento.

2.5.4. Peso específico inicial;

O peso específico corresponde a relação entre o peso da amostra e o volume que ela ocupa, sendo que para os RSU seu valor varia de acordo com a etapa considerada, ou seja, desde sua geração até o destino final nos aterros, variando também com o tempo. A composição, a profundidade e a compactação diária aplicada ao aterro são fatores que influenciam o peso específico do Lixo.

Conforme Boscov (2008), o peso específico e a espessura da camada de cobertura diária também influenciam a densidade dos RSU, pois a aplicação de uma sobrecarga provoca esse efeito.

Para Dixon & Jones (2005), o peso específico inicial dos resíduos depende de sua composição, da cobertura diária e do grau de compactação durante a disposição. Ao longo do tempo, o peso específico irá depender da profundidade, do grau de decomposição dos resíduos e das condições climáticas (MOTTA, 2011).

O valor do peso específico está diretamente ligado à sua composição gravimétrica (distribuição dos grupos de substâncias), ou seja, quanto maior a quantidade de componentes leves (papel, papelão, plásticos, etc.) ou quanto menor a quantidade de matéria orgânica, menor será seu valor (BORGATTO, 2010).

Segundo Borgatto (2010), o peso específico cresce com a profundidade em consequência da compressão e consolidação da massa de lixo devido à sobrecarga das camadas superiores. Wiemer (1982) e Kavazanjian et. al (1995) demonstraram que o peso específico pode variar de valores de 6 kN/m³ na superfície até cerca de 12 kN/m³ a profundidades em torno de 40 m, a partir das quais tende a se estabilizar.

Na literatura, existe uma ampla taxa de variação nos valores de peso específico, conforme apresentado na Tabela 4. Essa variação pode ocorrer em decorrência da composição do resíduo, da compactação, da degradação e da ocorrência de recalques.

Tabela 4. Os Pesos específicos dos RSU da Literatura

FONTE	PESO ESPECÍFICO (KN/m³)
Benvenuto e Cunha (1991)	Condição drenada: 10 Condição saturada: 13
Santos e Presa (1995)	Resíduos recém-Lançados: 7 Após Ocorrença de Recalque: 10
Kaimoto e Cepollina (1996)	Resíduos novos, não decompostos e pouco compactados: 5 a 7 Após compactados e ocorrência de Recalque: 9 a 13
Mahler e Iturri (1998)	10,5 (seção com 10 meses de alteamento)
Abreu (2000)	Resíduos soltos: 1,5 a 3,5 Resíduos mediantemente denso: 3,5 a 6,5 Resíduos densos: 6,5 a 14
Miranda (2004)	compactação variada: 9,1 a 19,7
Bauer et. al. (2005)	resíduos velhos e degradados: 8,6 a 15,6

Fonte: BOSCOV (2008) e CARVALHO (2006)

2.5.5. Idade do aterro;

A idade do aterro é muito importante para a avaliação do seu potencial de recalque, pois aterros mais antigos apresentam menor potencial de recalques que os aterros mais recentes. Ao longo do tempo, parte do maciço sanitário é consumido pela decomposição e biodegradação dos componentes orgânicos, sendo que esse processo

ocorre de forma muito lenta, podendo chegar a mais de 10 anos dependendo das condições no interior do maciço. A biodegradação, causada por microrganismos, promove a transferência de massa da fase sólida para a fase líquida e gasosa. A dissipação das pressões neutras é um processo semelhante ao adensamento de solos, ocorrendo com a expulsão desses fluidos do interior do maciço do aterro sanitário e demanda certo tempo. Além disso, Boscov (2008) também inclui as deformações lentas sob carga constante em razão de fenômenos viscosos (creep).

Segundo Durmusoglu et. al (2005), o recalque ocorre em três etapas. A primeira é a compressão imediata, que acontece em resposta direta ao peso próprio e/ou a cargas externas aplicadas ao resíduo. A segunda é a compressão primária, que ocorre devido à dissipação de líquidos e gases. Esta fase pode ser concluída logo após a colocação dos resíduos, isto é, dentro de alguns meses. O último estágio, a compressão secundária, é geralmente causada por redução de massa a longo prazo, reorientação das partículas e compressão lenta de alguns constituintes residuais. Esta etapa pode representar uma parte importante do recalque total do aterro e ocorre ao longo de muitos anos.

As mudanças ambientais podem causar um aumento ou diminuição da velocidade de decomposição da matéria orgânica, já que as reações químicas e biológicas que ocorrem no interior do aterro são influenciadas pela temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação e outros (MARIANO, 1999).

2.5.6. Fatores ambientais (umidade, temperatura e condições climáticas)

O teor de umidade de um maciço sanitário é muito importante na velocidade de degradação dos materiais putrescíveis e, conseqüentemente, no desenvolvimento de pressões neutras e recalques. Segundo Boscov (2008), o teor de umidade varia com a composição gravimétrica, a profundidade, a pluviometria e as condições de drenagem interna e superficial do maciço. A entrada de água da chuva pela cobertura, a geração de chorume e as condições internas de drenagem do maciço podem influenciar a variação da umidade no interior do maciço.

Não há uma normatização específica para a determinação do teor de umidade dos RSU. A secagem de amostras em estufa a 105°C/110°C, como normatizado para solo, pode acarretar decréscimo de massa adicional à evaporação de água devido à volatilização de algumas substâncias.

A temperatura é um parâmetro físico que interfere no processo de decomposição, ou seja, interfere nas reações químicas e bioquímicas como também nos processos biológicos que ocorrem no interior da célula. A temperatura condiciona o ambiente e a sobrevivência dos seres vivos. Segundo Aires (2013), a temperatura é um dos fatores de grande influência na anaerobiose, pois os micro-organismos não possuem meio para controlar sua temperatura corporal e dependem da temperatura do meio.

As condições climáticas são um fator muito importante, pois pode alterar o teor de umidade e interferir no processo de biodegradação, como também podem comprometer a estabilidade do aterro, caso haja um grande volume de precipitação, ocasionando infiltração. Segundo Alcântara (2007), as condições climáticas e a composição dos resíduos são fatores relevantes que interferem na evolução do processo de degradação em aterros sanitários e, portanto, devem influenciar também na evolução e magnitude dos recalques observados em função do tempo de aterramento.

2.5.7. A decomposição da matéria orgânica

A biodegradação influencia o comportamento dos maciços de resíduos ao longo do tempo com a diminuição da compressibilidade e da permeabilidade dos RSU e consequentemente a contínua perda de massa e o aumento da densidade. Para Aires (2013), Melo (2011), Monteiro (2003), Mariano (1999) e Jucá et. al (1999), a biodegradação é reconhecida como o principal mecanismo que influencia nos recalques ao longo do tempo.

O resíduo depositado se transforma devido à ação integrada de processos físico-químicos e biológicos, que resultam na produção de líquidos, gases e compostos inertes. As modificações biológicas desempenham um papel sensível, atuando sobre os resíduos putrescíveis, de degradação mais fácil, tais como restos de verduras, frutas, carnes, folhas, e, em certa medida, sobre os resíduos de celulose, tais como papéis, cartões, papelões e madeira (SANTOS & PRESA, 1995). Esta decomposição resulta na liberação de energia na forma de calor e gases (principalmente metano CH_4).

A matéria orgânica, inicialmente sólida, sofre ação microbiológica, o que provoca sua transformação em uma grande quantidade de gases metano (CH_4), gás carbônico (CO_2), ácido sulfídrico (H_2S), amoníaco (NH_3), dentre outros gases, e uma

menor quantidade de líquido (chorume). GANDOLLA et al. (1994) defendem que cerca de 25% da massa total do depósito é transformada em biogás.

Deve-se salientar que a degradação por ação biológica ocorre sob duas condições: a aeróbia e a anaeróbia, ou seja, com presença ou não de oxigênio. A transformação aeróbia (com presença de oxigênio) é mais rápida, ao passo que a degradação anaeróbia (sem presença de oxigênio) é mais lenta. A fase líquida, gerada em função da degradação biológica da matéria orgânica presente no lixo, também contribui para a redução de volume do maciço, uma vez que inicialmente há a conversão de material sólido em líquido, e este desloca-se, aumentando a porosidade do meio. Em segundo lugar, ao percolar, este líquido pode ocasionalmente solubilizar partículas e conduzi-las, depositando-as em vazios maiores ou levando-as para fora do maciço (fenômeno semelhante à erosão do subsolo, conhecido como efeito *piping*).

2.6. Monitoramento dos gases

O monitoramento dos gases em conjunto com os demais parâmetros monitorados serve para avaliar o processo de decomposição da matéria orgânica, avaliar a possibilidade de aproveitamento do biogás para geração de energia e estimar a emissão de gases liberados na atmosfera (ALCÂNTARA, 2007).

Em condições anaeróbias, a biodegradação da fração orgânica dos resíduos produz o biogás que é composto por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO), sulfeto de hidrogênio (H_2S), além de vários outros gases em quantidades muito pequenas.

Segundo Alcântara (2007), a evolução das concentrações de gases durante a vida do aterro pode durar de 10 a 80 anos ou mais. Geralmente, admite-se que essa evolução esteja associada a cinco fases de degradação, conforme ilustrado no modelo conceitual da Figura 9. A duração de cada fase pode ser consultada na Tabela 5. Portanto, além da natureza dos resíduos, o estágio de decomposição é um fator determinante para a composição do biogás ao longo do tempo.

Figura 9. Fases da decomposição dos resíduos com subprodutos gerados e intervalo de duração.

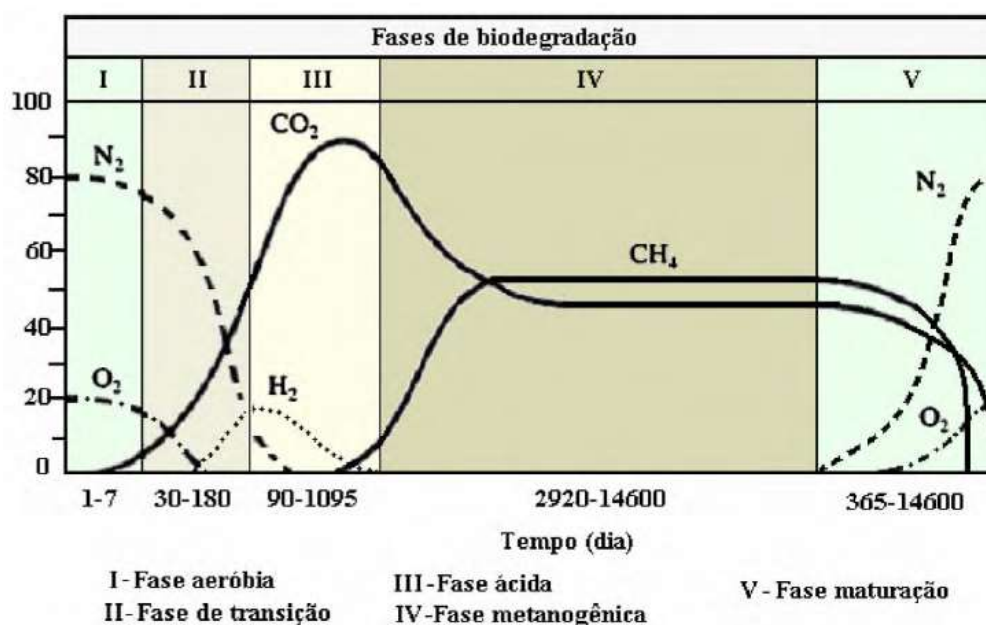


Tabela 5. Fases da decomposição dos resíduos.

Fases	Intervalo de duração das fases
I	algumas horas a 1 semana
II	1 mês a 6 meses
III	3 meses a 3 anos
IV	de 8 anos a 40 anos
V	1 ano a 40 ano

Fonte: Maciel (2009)

A primeira fase de decomposição ocorre em um ambiente com a presença de oxigênio, sendo uma fase aeróbia que geralmente chega a durar alguns dias. Segundo Maciel (2009), a primeira fase também é chamada de ajuste inicial, onde o processo de decomposição aeróbia se estabelece à medida que os resíduos vão sendo depositados e a umidade vai se acumulando na massa de resíduos. Esta fase pode ocorrer por mais tempo, caso haja a presença de oxigênio. Em aterros com coberturas muito permeáveis, como na Muribeca, o oxigênio se faz presente por longos períodos nos primeiros 3 m da massa de resíduos (JUCÁ et. al. 1999).

A segunda fase, chamada de fase de transição, ocorre entre a decomposição aeróbia e a anaeróbia dos resíduos e muitas vezes se confunde com a própria fase aeróbia. As condições redutoras se estabelecem com a troca do oxigênio por nitratos e sulfatos, que são os receptores de elétrons. Na fase de transição intensifica-se a produção de gás

carbônico, por ser gerado como um subproduto da fermentação da matéria orgânica (AUDIBERT, 2011).

A terceira fase é caracterizada pela fase ácida, onde intensifica-se a formação de ácidos orgânicos e sua conversão em compostos intermediários, como o ácido acético, que será um grande gerador de metano. Devido à presença acentuada de ácidos, o pH do ambiente antes neutro (fase aeróbia) cai para valores entre 5,0 e 6,0. O decréscimo do pH afeta a solubilidade de metais e de nutrientes (fósforo/nitrogênio), os quais tendem a se dissolver no lixiviado (MACIEL, 2009).

A quarta fase, chamada de fase metanogênica, é a mais longa do processo e é caracterizada pela transformação de ácidos intermediários, predominantemente acético, em CH_4 e CO_2 pelas bactérias metanogênicas. A produção de dióxido de carbono decai até se estabilizar em valores entre 35% a 50% do gás gerado no aterro. A produção de gás metano tende a crescer no início da fase e se estabilizar na faixa de 45% a 60% da parcela do biogás gerado (AUDIBERT, 2011).

E a quinta fase, denominada de fase de maturação, a produção do metano e gás carbônico cai em decorrência a diminuição dos nutrientes. Na massa de resíduos, restam os substratos de difícil biodegradação, tornando lenta a decomposição microbiológica. Segundo Maciel (2009), o ingresso do O_2 e N_2 na massa de resíduos tende a ocorrer em virtude da queda da pressão interna dos gases causada pela fraca atividade microbiana.

De uma forma geral é difícil ter uma precisão de tempo de duração das fases, tendo em vista que vários fatores podem interferir e influenciar os processos biológicos das mesmas. Sabendo que as concentrações de gases apontam para identificar em que fase de decomposição a célula de aterro se encontra, é possível analisar o comportamento dos deslocamentos verticais em relação aos dados observados das concentrações de gases.

Os recalques imediatos e os causados por compressão primária ocorrem em um curto período de tempo, no qual recebem maior influência da ação mecânica do que da ação biodegradativa. Na fase de compressão secundária, porém, os recalques ocorrem principalmente por consequência da decomposição da matéria orgânica, que diminui o volume da massa, formando vazios que tendem a colapsar devido às cargas impostas pela própria massa. Neste período, a concentração de metano se mostra estável e os recalques apresentam velocidades constantes. Com o passar do tempo, as velocidades dos recalques reduzirão por completo e, em paralelo, a produção de metano também diminuirá, como consequência da redução dos nutrientes.

2.7. Monitoramento dos Deslocamentos de Aterro Sanitário

O monitoramento dos deslocamentos revela o movimento atual do aterro, comparando-o com um padrão de comportamento típico e com dados históricos específicos do próprio aterro, a fim de avaliar sua situação real.

A instalação de instrumentação possibilita o controle de segurança durante a fase construtiva e subsidia sua manutenção. A quantidade e a localização dos instrumentos são determinadas de acordo com os objetivos pretendidos e instaladas em locais que ocorram as maiores variações nas condições do talude.

A operação diária com adequado controle sobre as condições da disposição dos resíduos define o estado geral do maciço. A qualidade diária da operação, desde que mantidas e atendidas as condições projetadas, é um dos fatores de garantia da estabilidade geomecânica a qualquer tempo, principalmente nas futuras fases operacionais.

Segundo LOPES & GOMES (2000), o monitoramento geotécnico do aterro inclui o acompanhamento dos recalques e das deformações horizontais do maciço de resíduos. Isso se deve ao fato de que os mecanismos de recalques permitem a redução do volume da massa de resíduos ao longo do tempo.

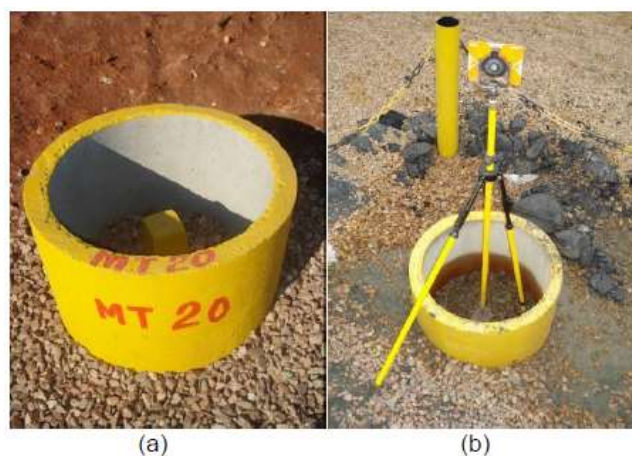
As deformações horizontais e verticais podem ser medidas com a utilização de marcos superficiais. O marco superficial consiste em uma base de concreto na qual é fixado um pino metálico, que serve de referência para observar o deslocamento por meio de instrumentos topográficos de precisão. As leituras destes instrumentos são feitas de forma sistemática e periódica por meio de levantamento topográfico eletrônico de precisão ("estação total").

Segundo a norma NBR 11.682 (ABNT, 2009), os movimentos superficiais horizontais e verticais deverão ser monitorados por meio de marcos superficiais, com controle topográfico de precisão a partir de bases localizadas fora da área sujeita a deslocamentos. A Figura 10 ilustra um exemplo de marco superficial e instrumento topográfico.

Outra forma de medir os recalques superficiais é com o uso de placas metálicas instaladas na superfície do aterro. As placas metálicas de aço têm, geralmente, uma base com dimensão de 60 cm x 60 cm, com uma haste central de metal ou revestida de PVC. Essa haste fica livre para permitir o deslocamento vertical da placa, que é medido pelo nivelamento da extremidade superior da haste (ALCÂNTARA, 2007).

Leituras periódicas são realizadas para o acompanhamento dos deslocamentos superficiais. Embora não haja uma normatização para a padronização e o uso das placas metálicas, esta metodologia já vem sendo utilizada na literatura técnica por diversos pesquisadores (MARIANO, 1999; ALCÂNTARA, 2007; LEITE, 2008; TAPAHUASCO, 2009; ARAÚJO NETO, 2016; entre outros). A Figura 11 ilustra como são instaladas as placas metálicas superficiais para o monitoramento dos deslocamentos verticais em um aterro sanitário.

Figura 10. (a) Marco topográfico e (b) Equipamento utilizado na leitura dos marcos



Fonte: DENARDIN, 2013.

Figura 11. Placa superficial para monitoramento de recalques superficiais



2.8. Critério de Avaliação dos Recalques

Em aterros sanitários, a distribuição e o modo de ocorrência de deslocamentos horizontais e verticais são diferentes daqueles que ocorrem em maciços terrosos. No caso dos maciços terrosos, os valores característicos de deslocamentos e velocidades para

diferentes graus de risco, de acordo com a norma brasileira de estabilidade de taludes NBR 11682 (ABNT, 2009), estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Movimento de massa para maciços de solo.

Grau de Risco	Deslocamentos característicos (cm)		Velocidade Característica média (mm/dia)	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
alto	> 20	> 10	> 20	>20
médio	5 a 20	2 a 10	1 a 20	1 a 20
baixo	< 5	< 2	< 20	< 20

Fonte: ABNT, 1991.

Para os Aterros sanitários, ainda, não existe uma referência normativa de valores característicos para análise de deslocamentos verticais e horizontais. Segundo BOSCOV (2008), o estabelecimento de critérios de análise tem sido feito geralmente em função do histórico de dados do aterro sanitário e da experiência anterior da empresa responsável pelo monitoramento.

Oliveira (1996) propõe critérios de avaliação de velocidade de deslocamento, nos quais são apresentados, na Tabela 7, os níveis de alerta de velocidade de deslocamentos para marcos superficiais instalados em aterros sanitários.

Tabela 7. Critérios para velocidades de deslocamento para aterros sanitários.

Atenção	Alerta	Intervenção
$v \leq 2,5$ cm/dia	$2,5 < v \leq 10$ cm/dia	$v > 10$ cm/dia

Fonte: Oliveira (1996)

No Aterro Sanitário Bandeirantes, em São Paulo, Boscov (2008) apresenta valores mínimos e máximos de recalques específicos (RE), velocidade de recalques (VR) e velocidade de deslocamento horizontal (VDH) na Tabela 8.

Tabela 8. Valores mínimos e máximos do histórico de dados do Aterro Sanitário Bandeirantes

Tempo (anos)	RE (%)		VR (mm/dia)		VDH (mm/dia)	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
1	0	7	1,0	14,0	9,0	15,0
5	3	22	-2,0	5,0	4,5	11,0
10	4	32	-3,0	2,5	2,0	9,5
15	6	38	-4,0	2,0	1,0	7,0

Fonte: BOSCOV (2008)

Bosco (2008) cita outro exemplo de critérios para a análise de velocidades de deslocamentos, apresentado na Tabela 9, referente ao aterro sanitário CDR Pedreira (Centro de Disposição de Resíduos Pedreira), em São Paulo.

Tabela 9. Critérios para velocidades de deslocamento no aterro CDR Pedreira.

Nível de alerta	velocidade de deslocamento horizontal e vertical (cm/dia)	Periodicidade recomendada para as leituras	Critérios de decisão e ações preventivas
1	Menor que 0,25	Semanal	Aceitável
2	Entre 0,25 e 1,0	Dois dias	verificação <i>in situ</i> de eventuais problemas
3	Entre 1,0 e 4,0	Diário	verificação <i>in situ</i> e intervenções localizadas
4	Entre 4,0 e 14,0	Diário	Paralisação imediata das operações no aterro e intervenções localizadas
5	Maior que 14,0	Diário	Declaração de estado de alerta, paralisação imediata das operações, acionamento da defesa civil para as providências cabíveis

Fonte; Bosco (2008)

Com base no histórico de dados do monitoramento do aterro sanitário Sítio São João, Rocha et al. (2016) propuseram a redução dos limites de alerta para velocidades de deslocamentos verticais e horizontais em aterros sanitários, para uso após o encerramento, conforme a Tabela 10.

Tabela 10. Velocidades de deslocamentos verticais e horizontais em aterros sanitários após encerrados.

Atenção	Alerta	Intervenção
$v \leq 1,0$ cm/dia	$1,0 < v \leq 2,5$ cm/dia	$v > 2,5$ cm/dia

Fonte: Rocha et. al. (2016)

Cada aterro sanitário tem características próprias para o desenvolvimento de recalque, então é preciso ter muita atenção ao adotar critérios de deslocamentos verticais e horizontais de outros aterros. Fatores de grande influência são a geometria do aterro, a composição dos resíduos, o clima e os sistemas de drenagem implementados (BOSCOV, 2008).

3. METODOLOGIA

Esta pesquisa foi realizada em parceria com a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), tendo como foco o monitoramento do Aterro Sanitário de Campina Grande/PB, conduzido pelo Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA).

A metodologia aplicada teve como base a análise dos dados do monitoramento realizado na célula 2 do aterro sanitário, localizado no município de Campina Grande-PB. O monitoramento dos deslocamentos verticais teve início no dia 13 de setembro de 2016, 128 dias após a finalização da disposição de RSU na célula, e, dessa forma, não foi possível medir os deslocamentos imediatos. Isso ocorreu devido ao início dos trabalhos operacionais do aterro, como a finalização da camada de cobertura, a compactação das bermas de acesso, a regularização dos taludes e a instalação dos elementos de drenagem superficial, os quais impossibilitaram a instalação de instrumentos para a medição dos recalques imediatos causados pelo peso próprio do maciço sanitário. Durante este mesmo período foi realizado, também, o monitoramento das concentrações de gases da célula 2 do Aterro sanitário. Não foi possível a realização de sondagem na célula nem a continuidade das análises físico-químicas dos líquidos produzidos no interior do maciço por falta de recursos financeiros.

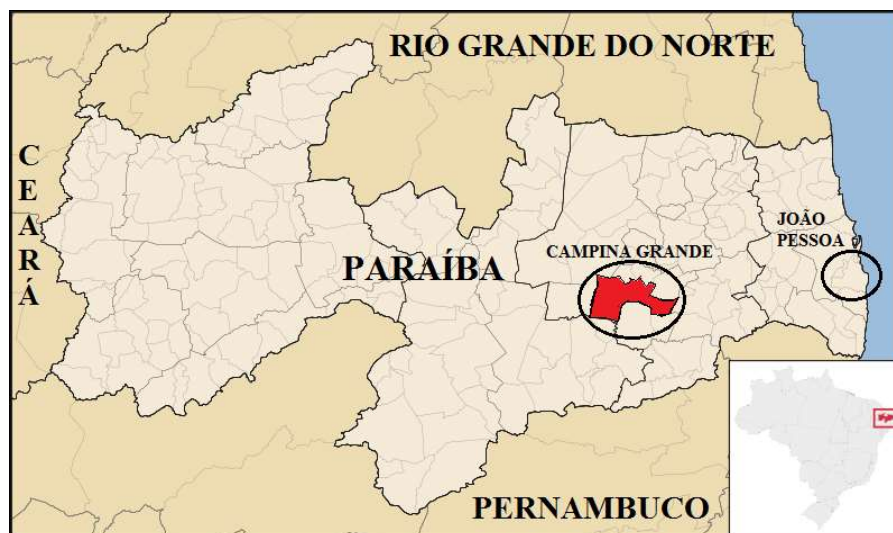
As análises dos recalques, bem como o monitoramento das concentrações de gases, serão realizadas com base nos dados de monitoramento geotécnico (período de 1 ano) e nos dados de precipitação fornecidos pelo INMET. Estes resultados serão analisados e comparados com outros resultados da bibliografia técnica.

3.1. Área de Estudo

Esta pesquisa foi realizada no município de Campina Grande/PB, localizado na região do Agreste Paraibano e inserido no Semiárido Brasileiro. A região possui temperatura média de 22,7°C, evaporação anual de 1417,4 mm e pluviosidade média anual de 802,7 mm/ano (AESAs, 2017), o que representa condições próprias das zonas semiáridas e latitudes tropicais. Situado na parte Oriental do Planalto da Borborema, o município de Campina Grande tem uma população estimada de 410.332 habitantes (IBGE, 2017) e abrange uma área territorial de 594,2 km², contendo quatro distritos: Catolé de Boa Vista, Catolé de Zé Ferreira, São José da Mata e Galante.

O município de Campina Grande encontra-se a uma distância de 126 km da capital paraibana, João Pessoa, sob as coordenadas geográficas de latitude de 7°13'50" S, longitude de 35°52'52" W e altitude de 551 m, Figura 12.

Figura 12. Mapa de localização do município de Campina Grande/PB.



Fonte: Adaptado ABREU (2017)

A Figura 13 ilustra o local destinado ao aterro sanitário de Campina Grande/PB, que é o campo experimental desta pesquisa. O aterro está localizado na Região Oeste do município, na Fazenda Logradouro II, em Catolé de Boa Vista, mais precisamente no Km 10 da rodovia estadual PB-138. A área destinada a disposição de RSU, para a construção das células do aterro sanitário, abrange aproximadamente 40 hectares.

As atividades do Aterro Sanitário foram iniciadas em julho de 2015 e administradas pela ECOSSOLO - Gestão Ambiental de Resíduos LTDA. No período da operação da segunda célula, o Aterro Sanitário de Campina Grande recebeu RSU de 6 municípios (Campina Grande, Lagoa Seca, Boa Vista, Barra de Santana, Puxinanã e Montadas), com uma demanda diária de 500 toneladas por dia. Segundo a ECOSOLO, 97% dos resíduos sólidos dispostos eram provenientes do município de Campina Grande/PB.

Neste trabalho, será analisada a segunda célula construída no aterro sanitário, já que essa não teve interrupções operacionais durante todo o período de monitoramento. Na Tabela 11, são apresentadas as coordenadas de localização geográficas, obtidas por meio de aparelho GPS (modelo etrex 10), da entrada do Aterro Sanitário e da célula 2.

Tabela 11. Coordenadas de localização do Aterro sanitário de Campina Grande/PB.

Descrição	Latitude	Longitude
Localização de entrada do aterro	7° 16' 26" S	36° 01' 05" W
Localização da célula 2	7° 16' 42" S	36° 00' 46" W

Figura 13. Localização do Aterro Sanitário de Campina Grande/PB.

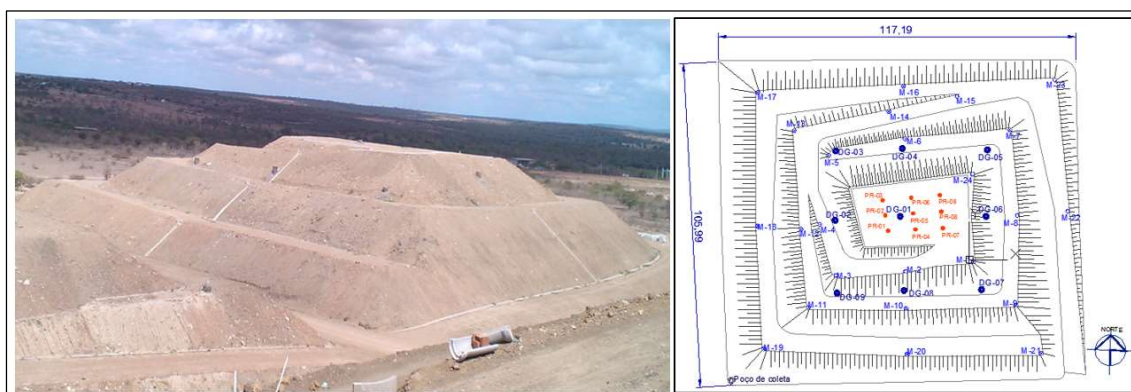


Fonte: GOOGLE MAPS (2017), SEPLAN (2017) e ABREU (2017).

Inicialmente, o Aterro Sanitário foi projetado para receber 350 toneladas de RSU por dia, para uma vida útil de 25 anos. Conforme a Figura 14, o projeto inicial prevê 20 células com área de 1 ha e altura de 20 m. A capacidade total de RSU para cada célula é de aproximadamente 70 mil toneladas de resíduo.

Para a segunda fase do projeto está prevista a união de 4 células e mais 20 m de alteamento. Logo, cada célula terá aproximadamente uma área de 5,0 ha e capacidade de 550 mil toneladas de RSU. A Figura 14 mostra a imagem da célula 2 do Aterro sanitário de Campina Grande-PB.

Figura 14. Célula 2 do Aterro Sanitário de Campina Grande/PB.



A pesquisa foi realizada com o apoio da equipe multidisciplinar, formada pelo Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA), que contribuiu para a execução das atividades discriminadas abaixo:

- Após a instalação dos drenos superficiais, em setembro de 2016, foram instaladas placas superficiais de recalque no topo da célula e marcos topográficos ao longo das bermas, objetivando monitorar os deslocamentos verticais e horizontais da célula de RSU;
- Para o conhecimento das propriedades físicas do RSU do aterro, foram coletadas amostras de resíduos frescos (RSU depositados recentemente) e realizados os ensaios em laboratório;
- O monitoramento, inicialmente, foi realizado semanalmente e em seguida passou a ser realizado quinzenalmente com o auxílio de uma estação total;
- O monitoramento das concentrações de gases deu início em 2016, antes do monitoramento geotécnico, porém, para a análise do comportamento dos recalques da célula 2, serão considerados apenas os dados de leitura do mesmo período do monitoramento dos deslocamentos verticais.

3.2. Caracterização dos RSU

A caracterização física dos RSU foi analisada por meio dos ensaios de composição gravimétrica desenvolvidos por Araújo Neto (2016) e do ensaio

granulométrico realizado a partir de amostras coletadas no Aterro sanitário de Campina Grande. A metodologia destes e de outros parâmetros será descrita nos itens seguintes.

3.2.1. Composição gravimétrica

A composição gravimétrica foi a mesma utilizada por Araújo Neto (2016), conforme Tabela 12.

Tabela 12. Composição dos RSU de Campina Grande/PB.

Classificação	(%)
MATÉRIA ORGÂNICA	46,5
PLÁSTICO	16,7
PAPEL/PAPELÃO	11,1
TÊXTEIS SANITÁRIOS	7,9
COMPÓSITOS	2,4
VIDROS	2,5
METAIS	0,6
OUTROS	12,4

Fonte: ARAÚJO NETO (2016)

3.2.2. Granulometria

A granulometria dos resíduos sólidos do aterro sanitário de Campina Grande foi realizada com base em uma versão adaptada da norma NBR 7181 (ABNT, 2016), que descreve o ensaio de granulometria para solos. Este ensaio permite quantificar em percentagens o tamanho das partículas.

Para a caracterização física, a preparação da amostra de RSU para o ensaio de granulometria teve as seguintes etapas:

- Coleta das amostras de resíduos do aterro sanitário de Campina Grande, com auxílio de uma retroescavadeira;
- Homogeneização dos resíduos com o auxílio de uma retroescavadeira;
- Após homogeneização dos resíduos será realizado o seu quarteamento;
- Das quatro pilhas formadas, duas serão descartadas e as outras duas homogeneizadas, resultando em uma única pilha formada pelas pilhas de lados opostos;

- Após o procedimento de homogeneização e quarteamento, os resíduos serão deixados para secagem ao ar até a umidade higroscópica;
- Dos resíduos secos ao ar será retirada a amostra para o ensaio de granulometria.

No laboratório foram separados 10 kg de material para a realização do ensaio. Esse ensaio é dividido em duas etapas: peneiramento da fração grossa e peneiramento da fração fina. Para o peneiramento da porção grossa, foram utilizadas cinco peneiras: uma circular e quatro retangulares, com área de aproximadamente 0,4 m² cada, todas com malhas metálicas, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15. Série de peneira para fração grossa e peneiramento sob agitação mecânica.



Logo após o peneiramento, o material retido em cada peneira foi pesado e encaminhado para a estufa com temperatura de 60°C por um período de 24 horas. Para obter o percentual de cada fração, utiliza-se a razão entre a massa retida em cada peneira e a massa total seca da amostra (Equações 1 e 2).

$$P_R = \frac{M_R}{M_{TS}} \times 100 \quad (1)$$

$$P_P = 100 - P_R \quad (2)$$

Onde,

P_R – Porcentagem retida no peneiramento grosso;

M_R – Massa retida;

M_{TS} – Massa total seca;

P_p – Porcentagem que passa no peneiramento grosso

Para a fração fina foi separado 1 kg de material que passou na peneira de 19,1 mm. Na realização do ensaio da fração fina, foram utilizadas uma série de peneiras circulares com malhas que variaram de 9,5 mm a 0,072 mm conforme Figura 16. O material retido em cada peneira foi colocado em cápsulas, pesado e, em seguida, levado para a estufa a uma temperatura de 60°C por um período de 24h. Após a secagem, foi pesado novamente. A lavagem da amostra foi realizada utilizando-se a peneira de 0,072 mm, conforme estabelece a norma NBR 7181 (ABNT, 2016).

A porcentagem de finos que passou em cada peneira foi calculada por meio das Equações 3 e 4:

$$P_r = \frac{M_r}{MT_{SF}} \times 100 \quad (3)$$

$$P_p = (100 - P_r) \times N \quad (4)$$

Onde,

P_r – Porcentagem retida no peneiramento fino;

M_r – Massa retida;

MT_{SF} – Massa total seca da parte fina;

P_p - Porcentagem que passa no peneiramento fino;

N – Fração que a massa fina representa do total da amostra.

Figura 16. Série de peneiras circulares utilizadas no peneiramento da fração fina.



3.2.3. Peso específico

Não foi possível medir o peso específico em campo. No entanto, com base nas quantidades de RSU depositadas na célula 2, fornecidas pela empresa responsável (ECOSSOLO), e no levantamento geométrico da célula, foi possível estimar esse valor de forma aproximada. Sabendo que o peso específico corresponde à relação entre o peso da amostra e o volume que ela ocupa, é possível calculá-lo conforme a Equação 5.

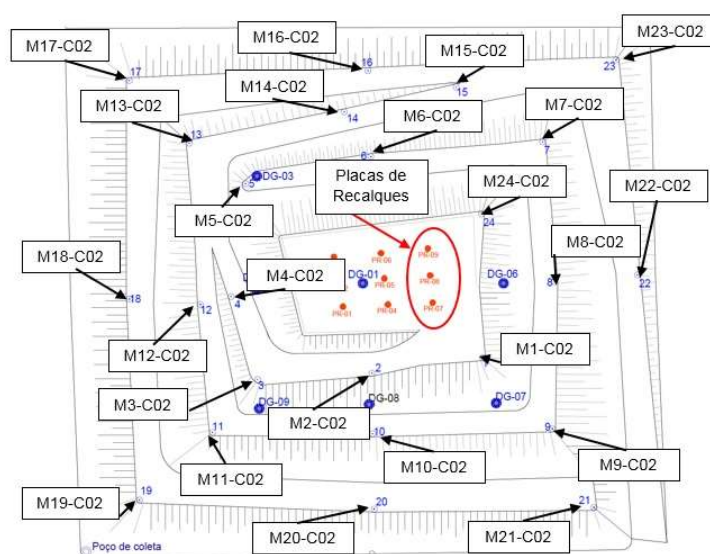
$$\delta = \text{Peso} / \text{Volume} \quad (5)$$

3.3. Monitoramento dos deslocamentos

A metodologia empregada para a obtenção dos deslocamentos superficiais por meio de marcos topográficos baseia-se na norma técnica de Estabilidade de Taludes NBR 11.682 (ABNT, 2009). Já a metodologia para a obtenção dos recalques superficiais, com o uso de placas metálicas, foi realizada de acordo com Leite (2008), objetivando a medição dos deslocamentos verticais.

No dia 13 de setembro de 2016, foram instalados os marcos topográficos e placas de recalques, para dar início ao monitoramento dos deslocamentos verticais e horizontais da célula 2. Os marcos topográficos foram distribuídos ao longo das bermas do aterro e as placas foram instaladas na crista da célula, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17. Distribuição dos pontos de monitoramento superficiais da célula de RSU.



Inicialmente as leituras foram realizadas semanalmente, como não foram verificadas variações significativas, a partir de dezembro de 2016, o monitoramento passou a ser realizado quinzenalmente. O monitoramento, dos deslocamentos, realizado no Aterro sanitário foi referenciado por pontos fixos localizadas próximas das células.

Os marcos topográficos têm um formato cilíndrico com diâmetro de 15cm e altura de 30cm, são elementos de concreto com um pino metálico referencial, engastado em sua extremidade. As placas metálicas têm uma base com formato quadrado medindo 40 cm por 40 cm e uma haste central de 50 cm, conforme Figura 18.

Figura 18. Equipamento utilizado na leitura dos deslocamentos (a); Marco topográfico (b); placa de Recalque (c).



As leituras periódicas, das coordenadas dos marcos e das placas, foram realizadas por uma equipe de topografia equipada com estação total e orientada pelo grupo multidisciplinar do GGA. As leituras dos deslocamentos são realizadas com base nas referências fixas. A diferença entre a leitura topográfica inicial e as subsequentes permite a determinação dos deslocamentos relativos da estrutura. Este método possibilita o monitoramento da magnitude e da variação das deformações superficiais, tanto horizontais quanto verticais.

O monitoramento dos deslocamentos permite acompanhar as movimentações do maciço e avaliar os riscos relacionados aos deslocamentos excessivos com antecedência.

Com isso, é possível prevenir acidentes decorrentes de recalques diferenciais que podem ocasionar a desestabilização do maciço.

3.4. Monitoramento das Concentrações de Gases

O sistema de drenagem do biogás no Aterro Sanitário de Campina Grande é composto por 9 (nove) drenos verticais em cada célula. Os drenos de gás foram denominados de DG-01 a DG-09. Os drenos verticais são compostos por manilhas de concreto perfuradas, para possibilitar a entrada do biogás ao longo de seu comprimento, com diâmetro interno de 0,28 m e externo de 0,37 m. Para proteger esta tubulação de drenagem, as manilhas são revestidas por britas, amarradas por uma malha de ferro, com diâmetro variando entre 0,90 e 0,92 m, conforme ilustrado na Figura 19. A Figura 20 ilustra como estão distribuídos e onde estão localizados os drenos verticais na célula 2.

Figura 19. Dreno vertical de gás (metros).

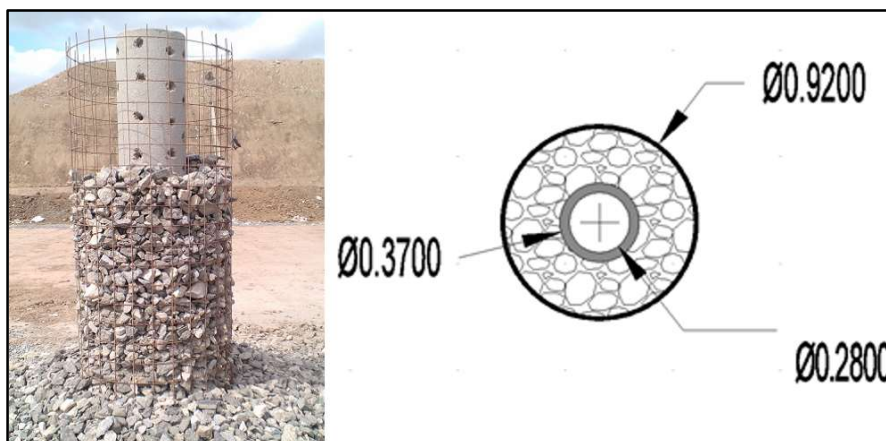
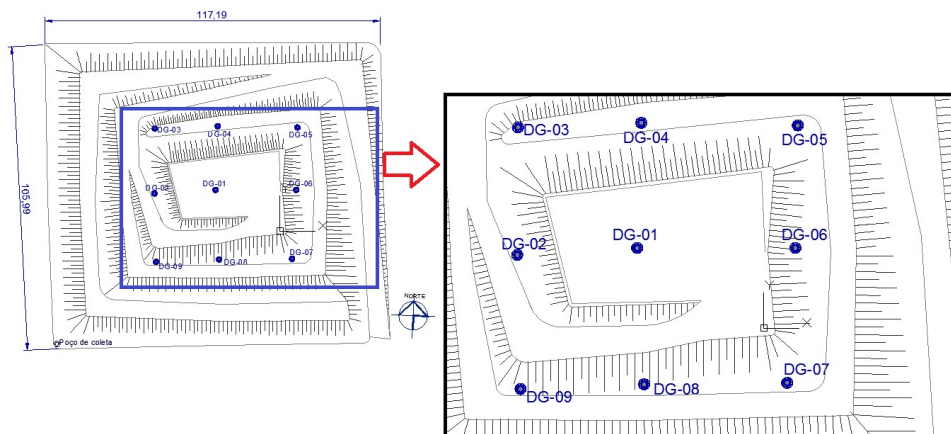


Figura 20. Posicionamento dos drenos verticais da célula 2.



O monitoramento do biogás foi realizado pela equipe multidisciplinar do GGA, responsável pelas leituras das concentrações dos gases. As concentrações de gases geradas são o resultado das atividades microbiológicas que decorrem da biodegradação do resíduo depositado na célula 2.

As medições da qualidade do biogás nos 9 (nove) drenos verticais foram realizadas por meio de um detector portátil e automático de gases com infravermelho, o Dräger modelo X-am 7000, que afere as concentrações de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), oxigênio (O_2), monóxido de carbono (CO) e gás sulfídrico (H_2S) (Figura 21). Este equipamento permite a obtenção de leituras em 180 a 300 segundos, com medições diretas no dreno de gás, proporcionando bom desempenho e medindo as concentrações nas seguintes faixas: 0-100 %v/v para CH_4 , CO_2 e O_2 ; e de 0-500 ppm para CO e H_2S .

Figura 21. Monitoramento da concentração dos gases nos drenos com o uso do Dräger



As medições foram realizadas com os drenos abertos à atmosfera (Figura 19), sendo utilizada uma mangueira flexível, adaptável ao Dräger, com comprimento suficiente para atingir pontos de profundidade intermediária dos drenos. Esta medida foi tomada a fim de monitorar a qualidade do biogás com uma menor interferência do ar atmosférico.

3.5. Condições Climáticas

Segundo Melo (2003), as condições climáticas interferem de maneira relevante na biodegradação, consequentemente na magnitude e velocidade dos recalques.

O monitoramento das condições climáticas teve como base os dados coletados nos portais eletrônicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), registrados pela estação situada na EMBRAPA/Algodão que fica na cidade de Campina Grande-PB, distante 13,8km do aterro sanitário, sob as coordenadas geográficas: Latitude de 7°13'S, Longitude de 35°53'W e Altitude de 546m. Analisou-se o clima do município de Campina Grande-PB, onde está localizado o aterro sanitário, a partir dos dados meteorológicos de precipitação diária (setembro/16 – Setembro/17).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentadas as análises e os resultados do monitoramento dos deslocamentos verticais ocorridos na célula 2, bem como as leituras das concentrações de gases. O período do monitoramento, com duração de 358 dias, teve início em setembro de 2016 e terminou em setembro de 2017.

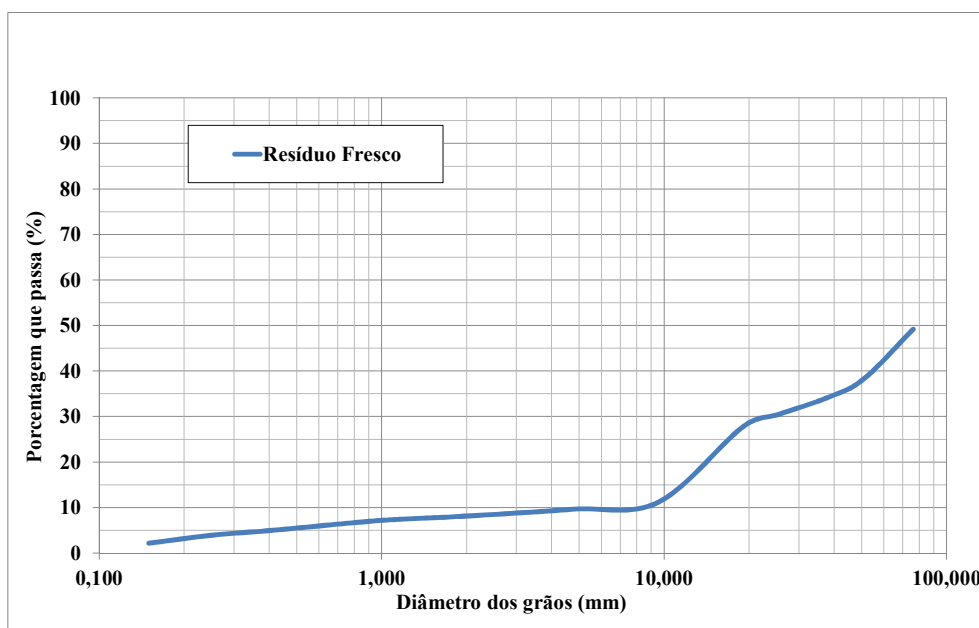
4.1. Características dos Resíduos Sólidos Urbanos

Para entender a ocorrência dos deslocamentos de um aterro sanitário é preciso compreender as características físicas e as propriedades geotécnicas dos resíduos sólidos urbanos depositados no aterro.

4.1.1. Granulometria

A Figura 22 mostra o resultado da granulometria obtida pelo método do peneiramento dos RSU frescos do aterro sanitário de Campina Grande/PB.

Figura 22. Distribuição Granulométrica dos RSU depositados no Aterro Sanitário de Campina Grande/PB.

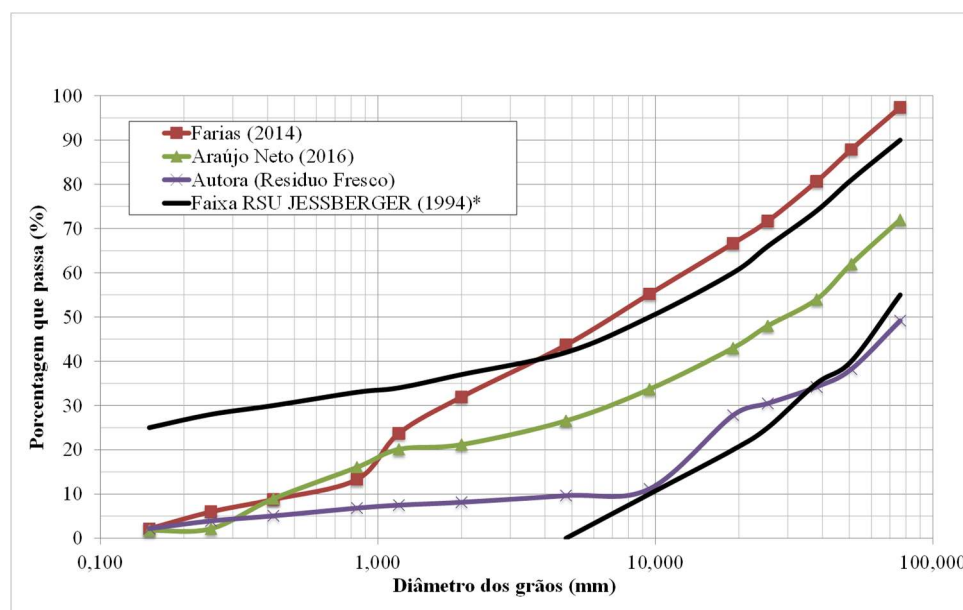


Observa-se na Figura 22 que 25% dos componentes dos resíduos frescos apresentam granulometria inferior a 20 mm e aproximadamente 75% dos componentes possuem diâmetros superiores a 20 mm. Logo, a fração grossa é a predominante nos RSU conforme classificação da metodologia do REMECOM - *Réseau Européen de Mesures pour la caractérisation des Ordures Ménagères* (DEFRA, 2004) que, conforme o mesmo autor, se trata de resíduos com idade inferior a 1 ano.

Farias (2014) obteve um percentual de 63% e Araújo Neto (2016) de 43% de finos, todos realizaram o ensaio com resíduos de Campina Grande/PB, porém apresentaram uma composição diferente, o que pode ter contribuído para resultados distintos.

A Figura 23 mostra que os resultados das curvas granulométricas de Araújo Neto (2016) e dos resíduos frescos do Aterro Sanitário estão dentro da faixa de distribuição das dimensões de partículas para resíduos urbanos proposta por JESSBERGER (1994). Já a de Farias (2014) encontra-se fora desta faixa no que se refere à fração grossa.

Figura 23. Faixa de Distribuição das dimensões de partículas.



Fonte: *JESSBERGER (1994)

Segundo Soares (2011), O percentual de materiais com granulação mais fina tende a aumentar com o aumento da idade do RSU, como resultado da biodegradação do material orgânico.

Conforme a Figura 22, os resíduos depositados possuem uma maior predominância de fração grossa, o que é esperado para resíduos frescos. Com o tempo, a

fração fina tenderá a aumentar devido à biodegradação, conforme ilustrado pela faixa de distribuição de partículas de Jessberger (1994) (ver Figura 23). Espera-se, portanto, que os recalques iniciais tenham uma maior influência dos processos mecânicos em comparação aos recalques biodegradativos.

4.1.2. Peso Específico

Conforme já apresentado na metodologia, o peso específico foi calculado com base nas informações apresentadas pela ECOSSOLO, empresa que administra o Aterro Sanitário de Campina Grande/PB. Considerando que o peso específico corresponde à relação entre o peso da amostra e o volume, o peso específico da célula 2 foi calculado pela razão entre a quantidade de material depositada e o seu volume. A quantidade de resíduos foi obtida separadamente por camada, conforme ilustrado na Figura 35. O volume de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) na célula 2 foi obtido por meio de um levantamento topográfico, conforme descrito na Tabela 13.

Tabela 13. Peso do RSU depositado na célula 2 e o Volume

Camadas da Célula 2	Peso (kN)	Volume (m³)
Camada 03	66.789,47	6.359,64
Camada 02	257.216,41	31.107,80
Camada 01	299.588,50	49.575,50
TOTAL	623.594,38	87.042,95

O valor do peso específico da célula 2 é, aproximadamente, de 7 kN/m³, o que, segundo Boscov (2008) caracteriza um peso específico de um aterro com resíduos novos, não decomposto e pouco compactado.

Sem uma sondagem não foi possível avaliar o peso específico em relação a profundidade. Segundo Borgatto (2010), o peso específico cresce com a profundidade em consequência da compressão e consolidação da massa de lixo devido à sobrecarga das camadas superiores.

4.2. Monitoramento dos Deslocamentos Verticais

O monitoramento dos deslocamentos verticais da Célula 2 do Aterro Sanitário de Campina Grande/PB ocorreu durante 358 dias, de setembro de 2016 a setembro de

2017. Para esse monitoramento, foram instaladas 9 (nove) placas metálicas na crista da célula e 24 marcos de concreto ao longo de toda a área da célula 2. As placas foram utilizadas especificamente para os deslocamentos verticais, enquanto os marcos permitiram o monitoramento de deslocamentos em geral, conforme ilustrado na Figura 17.

O resultado das leituras dos deslocamentos verticais, juntamente com o conhecimento dos fatores responsáveis pelos recalques, permite analisar o comportamento do maciço. Tal análise possibilita ampliações da capacidade do espaço e um melhor gerenciamento dos RSU depositados.

4.2.1. Monitoramento dos Marcos Superficiais

As análises das leituras dos marcos superficiais serão apresentadas por grupo de observação, onde cada grupo expressa os recalques ocorridos em uma mesma altura de camada, porém com diferentes idades nas quais foram depositados os resíduos.

O primeiro grupo de marcos a ser avaliado encontra-se na primeira camada de resíduos depositados da célula 2, e compreende os marcos M-15, M-16, M-17, M-18, M-19, M-20 e M-21, conforme indica a Figura 24. A Figura 25 apresenta um corte, indicando o perfil da primeira camada de resíduo da célula 2. A deposição de resíduos nesta primeira camada ocorreu entre 27 de dezembro de 2015 e 28 de fevereiro de 2016. Durante esses 2 meses, foram depositadas 29.959 toneladas de resíduos, que ocuparam um volume de 49.576 m³. O monitoramento da célula teve início em setembro de 2016, aproximadamente 195 dias após o encerramento da primeira camada. Posteriormente, foram depositados os resíduos das camadas subsequentes.

Figura 24. Posicionamento dos marcos M-15, M-16, M-17, M-18, M-19, M-20 e M-21

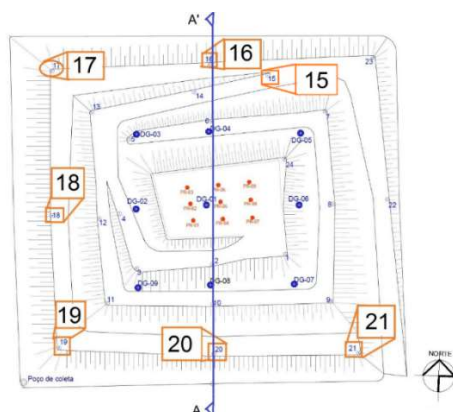
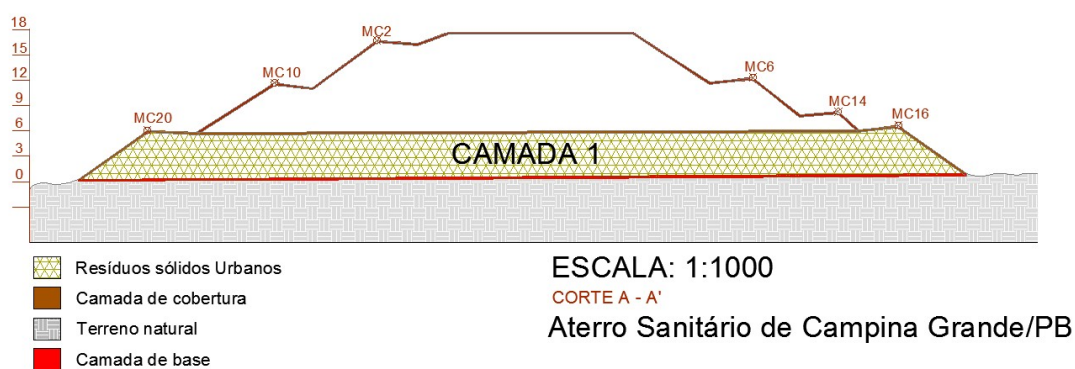


Figura 25. Corte longitudinal AA' da célula 2 (1ªcamada).



As espessuras das camadas, no início do monitoramento dos respectivos marcos estão descritas na Tabela 14. Para este trabalho apenas os deslocamentos verticais serão analisados. A Figura 26 apresenta os deslocamentos verticais ocorridos durante todo o período de monitoramento. A partir dessas leituras, foi possível obter a variação específica da altura, que é observada na Figura 27. Por sua vez, a Figura 28 apresenta as velocidades dos deslocamentos verticais monitorados pelos marcos M-16, M-17, M-18, M-19, M-20 e M-21."

Tabela 14. Espessuras dos Pontos Monitorados na 1ª Camada da Célula 2.

Marco	M-14	M-15	M-16	M-17	M-18	M-19	M-20	M-21
Espessura	8,102	6,078	5,796	7,309	7,085	7,677	5,73	4,970m

Figura 26. Recalques medidos ao longo do tempo

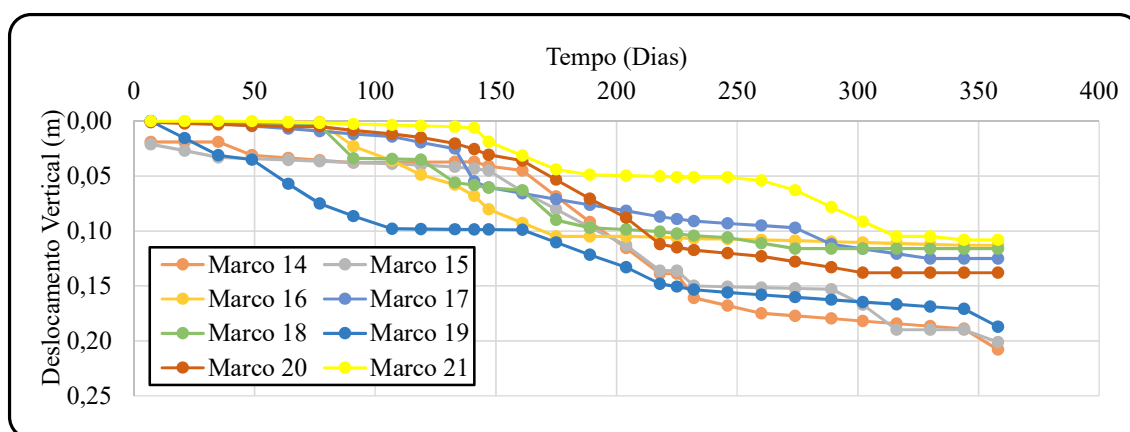


Figura 27. Deformação Específica da Primeira Camada

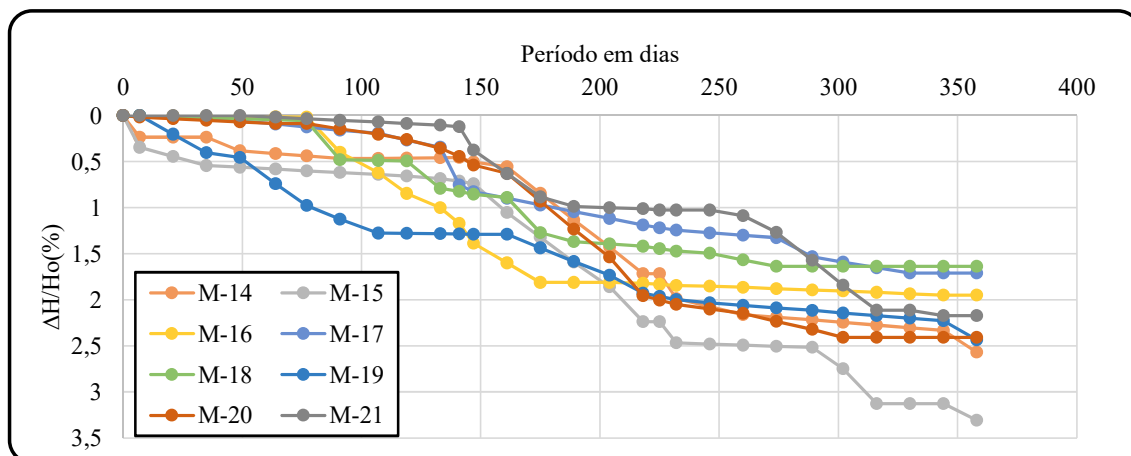
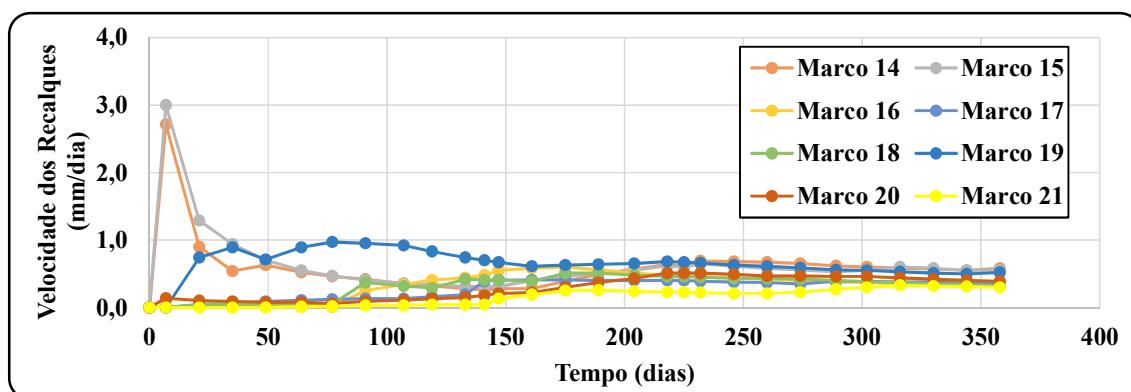


Figura 28. Velocidade dos deslocamentos verticais dos marcos superficiais



Para este grupo, os marcos superficiais estão posicionados em uma camada com espessura variando de 5 m a 7,7 m, onde a deformação específica apresentou uma variação de 1,7% a 3,3% em relação à altura inicial. Os recalques totais durante o período de monitoramento variaram entre 0,11 m e 0,20 m. No entanto, essa variação não inclui os recalques imediatos, pois o monitoramento só foi iniciado após o encerramento das operações na célula. Apesar de o marco M-15 estar posicionado em uma camada com espessura menor que a dos marcos M-17, M-18 e M-19, a sua variação e a quantidade de deformação foram maiores. Esse resultado pode ter sido influenciado pelas solicitações de carga dos veículos, já que o posicionamento do marco M-15 se encontra próximo à berma de acesso para manutenção da célula do aterro.

O monitoramento só foi realizado após 195 dias da deposição dos resíduos da camada em análise. Por essa razão, os recalques imediatos não puderam ser medidos devido à operação da célula. Neste período, a decomposição ocorre em um ambiente

anaeróbio, sem interferência de oxigênio, no qual as bactérias metanogênicas são responsáveis pelo processo de biodegradação. Conforme Gomes et. al (2017), os resultados da análise dos resíduos coletados em março de 2016 (Tabela 15), no interior da primeira camada da célula 2, apontam para uma fase metanogênica.

Tabela 15. Características físico-químicas dos resíduos sólidos urbanos da célula 2

Parâmetros	Concentrações		
	Resíduos Sólidos Urbanos		
	Superior	Intermediário	Inferior
pH	7,16	6,95	6,75
AT (mg./L)	445	1975	2820

Fonte: Adaptada de Gomes et. al (2017)

Segundo Monteiro (2003), as bactérias metanogênicas atingem a produção máxima de metano em valores de pH entre 6,5 e 7,6. Aries (2013) afirma que os metais alcalinos e alcalino-terrosos controlam a acidez, principalmente na fase metanogênica, pois atuam como estimuladores do processo. Após a fase metanogênica, a alcalinidade tende a subir, podendo variar de 6.000 a 14.000 mg/L.

Observa-se na Figura 28 que os recalques monitorados pelos marcos superficiais M-15 e M-14, inicialmente, apresentaram um aumento na velocidade dos deslocamentos. Isso indica um processo de acomodação dos marcos instalados na célula. No decorrer do tempo, tanto os marcos M-15 e M-14 quanto os demais (M-16, M-17, M-18, M-19, M-20 e M-21) exibiram comportamento semelhante a partir do 150º dia, com a velocidade passando a ser de 0,5 mm/dia.

De acordo com o monitoramento realizado por Melo (2003) na célula 4 do Aterro Sanitário da Muribeca, no intervalo entre o 200º e o 600º dia, observa-se uma velocidade de recalques que varia de 0,5 mm/dia a 1 mm/dia, valores que se assemelham aos encontrados na célula 2 no período equivalente de monitoramento. Farias (2014) observou que, após 200 dias de monitoramento dos recalques de uma célula experimental, a velocidade passou a ser menor que 2 mm/dia. No 306º dia de monitoramento, a célula apresentou uma deformação com velocidade em torno de 1 mm/dia. De acordo com os critérios determinados no Aterro Sanitário CDR Pedreira, em São Paulo, apresentados por Boscov (2008), as análises mostram que velocidades inferiores a 2 mm/dia são aceitáveis.

Na segunda camada, os resíduos sólidos foram depositados entre 29 de fevereiro e 22 de abril de 2016. Nesse período, um total de aproximadamente 25.722 toneladas de resíduos, ocupando um volume de 31.108 m³, foi depositado. Os marcos superficiais instalados na segunda camada, após 143 dias da finalização da disposição de resíduos, foram M-5, M-6, M-7, M-8, M-9, M-10, M-11, M-12 e M-13, onde encontram-se posicionados conforme ilustrados na Figura 29. A Figura 30 representa um corte na célula para ilustrar a espessura da segunda camada e o posicionamento dos marcos superficiais monitorados por meio de leituras topográficas semanais.

Figura 29. Posicionamento dos marcos superficiais distribuídos na célula 2

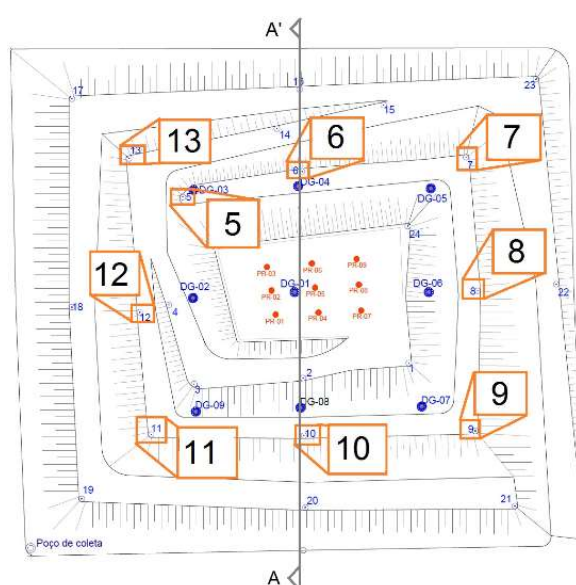
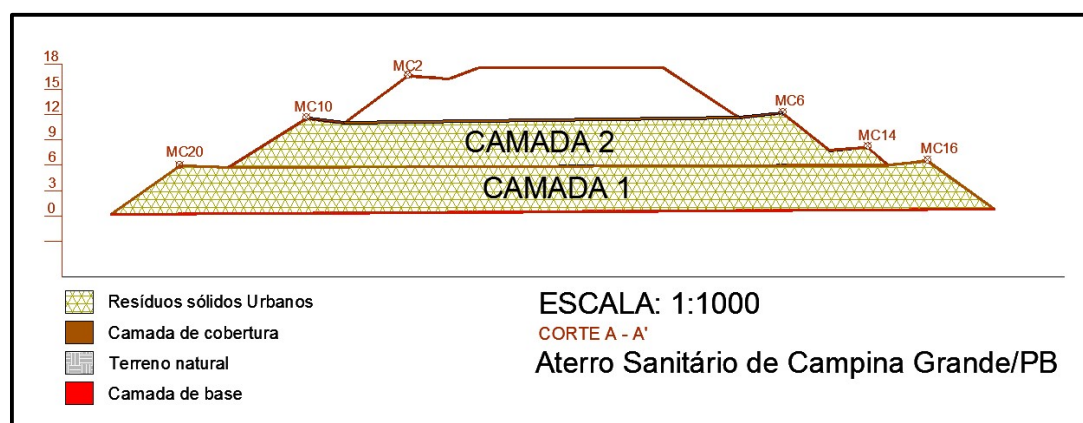


Figura 30. Corte longitudinal AA' da célula 2 (camada 2).



As respectivas espessuras iniciais das camadas de resíduos, correspondentes a cada marco superficial, estão descritas na Tabela 16. Essas espessuras representam o

ponto de partida do monitoramento, permitindo acompanhar o desenvolvimento dos deslocamentos.

Tabela 16. Espessuras dos Pontos Monitorados na 2ª Camada da Célula 2.

Marco	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9	M-10	M-11	M-12	M-13
Espessura (m)	12,244	11,591	10,905	9,678	10,366	11,302	12,666	12,265	10,882

A Figura 31 representa o desenvolvimento dos deslocamentos verticais monitorados por meio dos marcos superficiais M-5, M-6, M-7, M-8, M-9, M-10, M-11, M-12 e M-13. A Figura 32, por sua vez, mostra a variação específica em relação à altura no início do monitoramento, enquanto a Figura 33 ilustra a velocidade dos recalques ocorridos ao longo do tempo.

Figura 31. Recalques medidos por meio do monitoramento dos marcos superficiais.

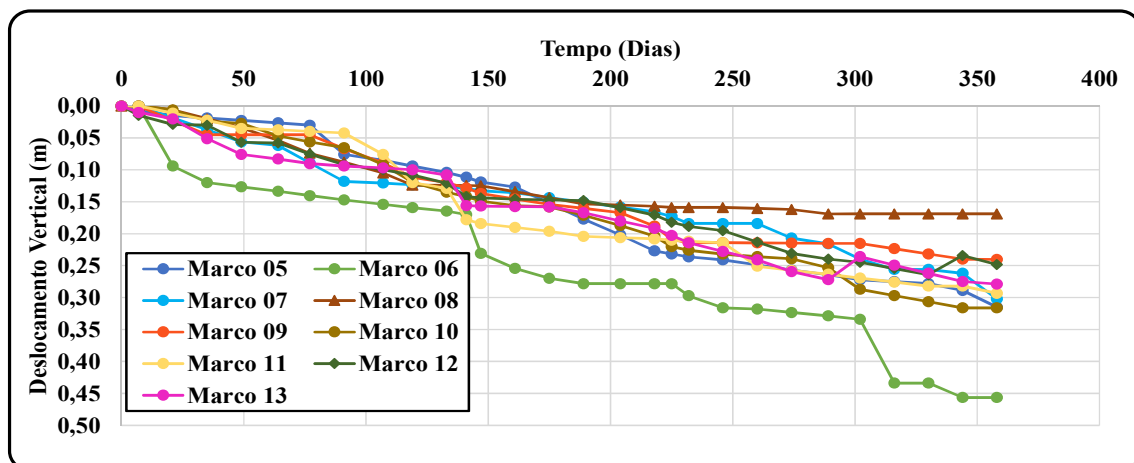


Figura 32. Deformação Específica da Segunda Camada

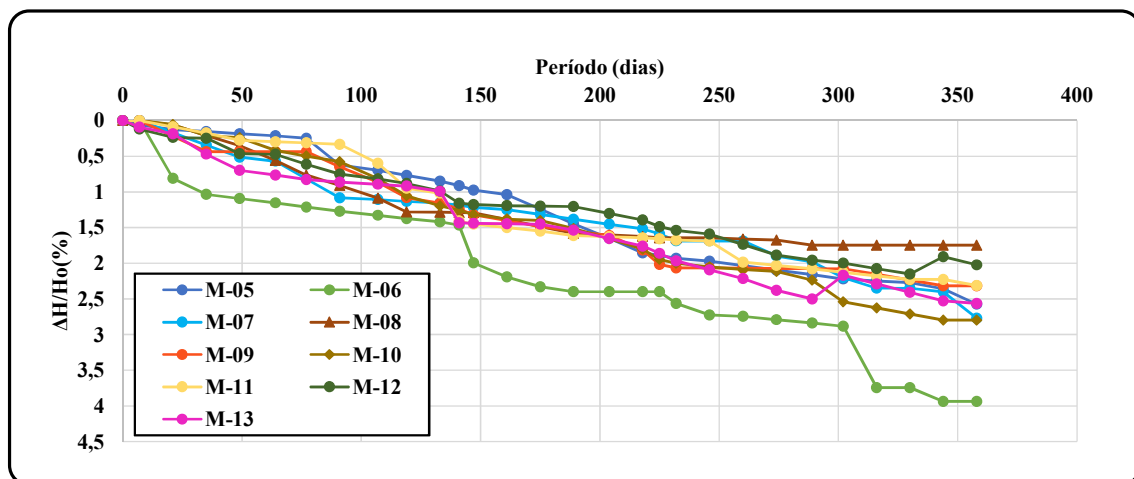
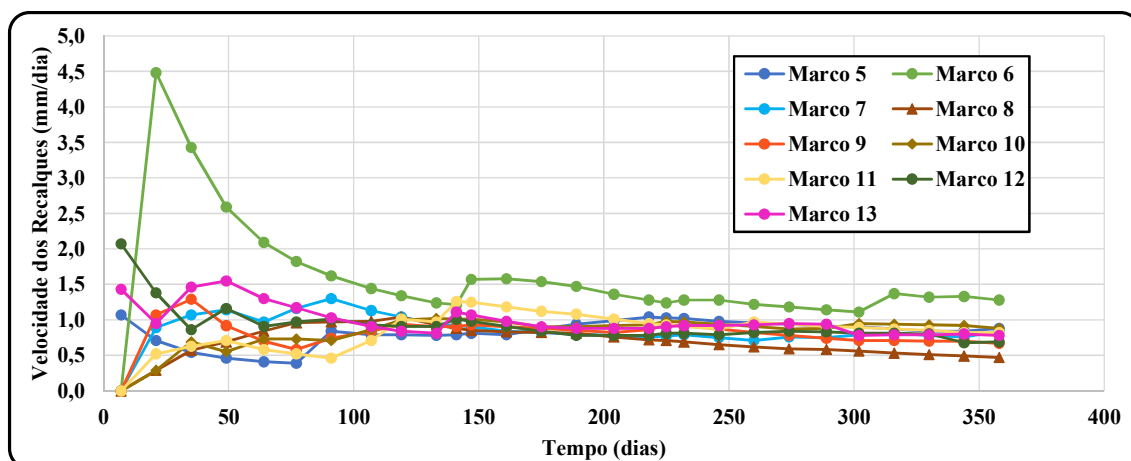


Figura 33. Velocidade dos Recalque monitorados



Na segunda camada, os marcos superficiais estão posicionados em pontos cujas espessuras variam de 10,37 m a 12,67 m. A deformação específica apresentou uma variação de 1,7% a 4% em relação à altura inicial. Os recalques totais durante o período de monitoramento variaram entre 0,16 m e 0,46 m. No entanto, essa variação não inclui os recalques imediatos, pois o monitoramento só foi iniciado após o encerramento das operações na célula. O monitoramento só foi realizado após 143 dias da deposição dos resíduos da segunda camada em análise. Por essa razão, os recalques imediatos não puderam ser medidos devido à operação da célula.

Em relação ao Aterro da Muribeca, Mariano (1999) afirma que a célula 1 apresentou uma deformação variando de 0,32% a 6,5%, enquanto na célula 2 a deformação foi de 1,4% a 8%. Já Monteiro (2003) indica que a deformação máxima anual na célula 4 foi de 3,74%.

A espessura das camadas de RSU tem uma relação direta com os deslocamentos verticais, pois quanto maior a quantidade de matéria orgânica, maior será a redução de volume dos resíduos devido à biodegradação, o que causa maiores recalques no maciço.

Conforme a Figura 31, não houve registro de recalques monitorados pelos marcos superficiais M-6, M-7, M-8, M-9, M-10 e M-11 na primeira semana de monitoramento. No entanto, na segunda semana, as leituras indicaram a ocorrência de recalques em todos os marcos. O marco M-6 registrou uma velocidade inicial superior à dos demais, mas em seguida passou a ter um comportamento semelhante. Já os marcos superficiais M-5, M-12 e M-13 começaram a apresentar recalques na primeira semana de leitura e continuaram com um comportamento semelhante aos demais. Essa diferença inicial pode ter sido causada por um processo de acomodação dos marcos instalados na

célula. No entanto, no decorrer do tempo monitorado, os deslocamentos se tornaram constantes para todos os marcos em relação à velocidade. Conforme a Figura 33, a partir do 100º dia de monitoramento, as velocidades entre os marcos variaram de 0,5 mm/dia a 1,5 mm/dia. Nesta segunda camada, a velocidade de deslocamento foi um pouco maior que a da primeira, o que pode ter sido ocasionado pela idade do RSU, bem como pela maior espessura da camada de resíduos. Teixeira (2015), em seu monitoramento no Aterro Sanitário de São Leopoldo/RS, observou uma velocidade variando de 0,7 mm/dia a 3,1 mm/dia.

A deposição de resíduos da terceira camada da célula 2 teve início em 23 de abril de 2016 e foi finalizada em 8 de maio de 2016. Em menos de um mês, foram depositadas 6.679 toneladas de resíduos, ocupando um volume de aproximadamente 6.360 m³. Os marcos superficiais instalados foram M-1, M-2, M-3, M-4 e M-24, e estão posicionados conforme indica a Figura 34. A Figura 35 apresenta um corte sentido A-A', ilustrando o posicionamento dos marcos e a espessura da camada de resíduo depositada na célula 2.

Figura 34. Posicionamento dos marcos superficiais M-1, M-2, M-3, M-4 e M-24.

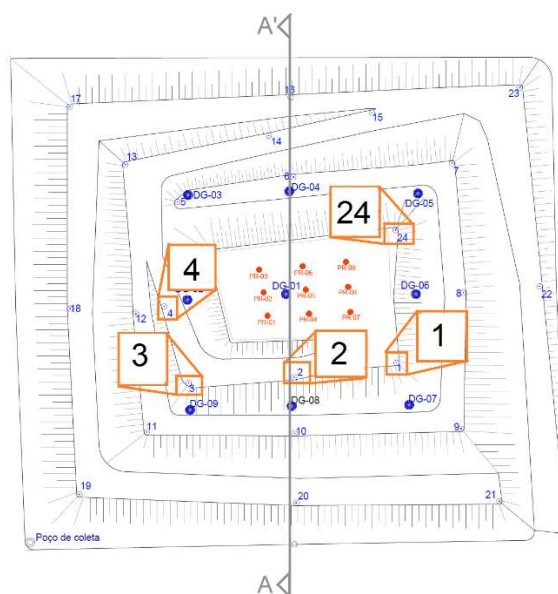
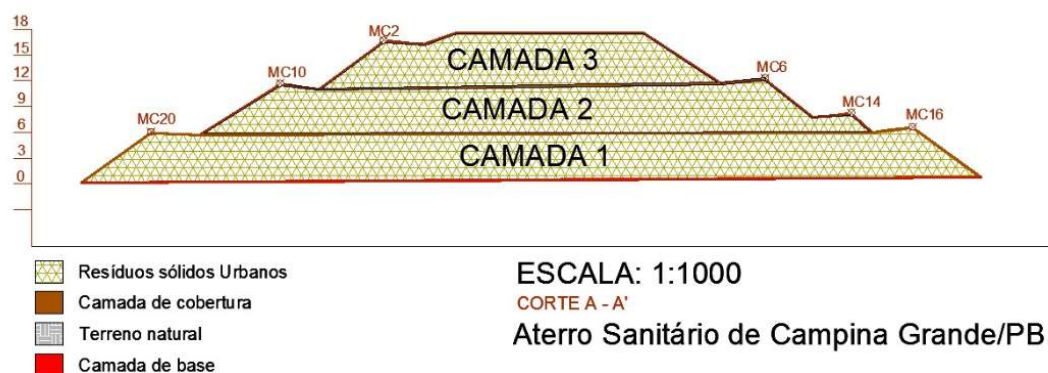


Figura 35. Corte longitudinal AA' da célula 2 (camada 3)



No início do monitoramento dos marcos topográficos da célula, foram medidas as espessuras de cada camada na qual os marcos estão instalados, conforme descritas na Tabela 17.

Tabela 17. Espessuras dos Pontos Monitorados na 3ª Camada da Célula 2.

Marco	M-1	M-2	M-3	M-4	M-24
Espessura (m)	16,159	16,261	15,701	13,653	16,825

Conforme a Figura 36, o desenvolvimento dos recalques ao longo dos 358 dias mostra os deslocamentos totais dos RSU monitorados pelos cinco marcos em análise. A Figura 37 apresenta a deformação específica e a Figura 38, a velocidade dos deslocamentos verticais ao longo do tempo.

Figura 36. Deslocamentos verticais monitorados por meio dos marcos M-1, M-2, M-3, M-4 e M-24

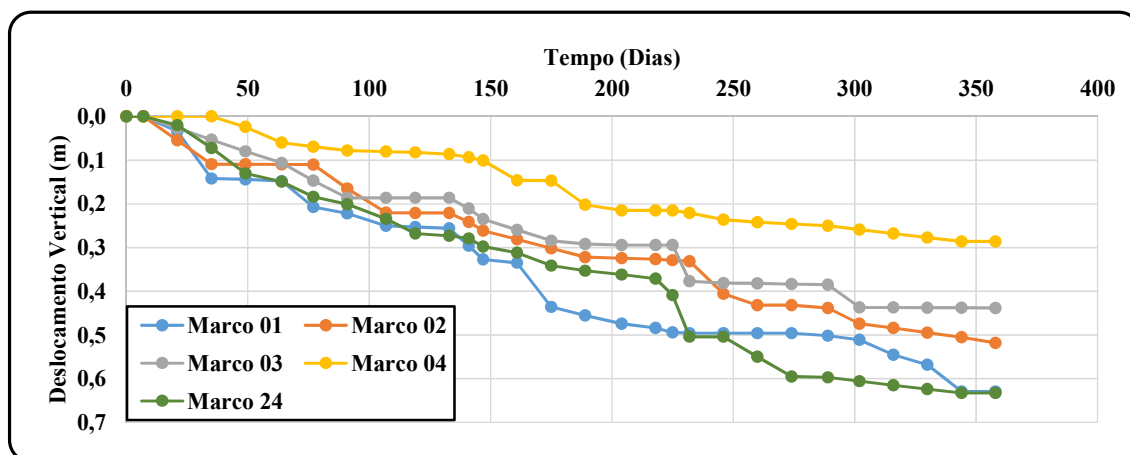


Figura 37. Deformação específica nos Marcos localizados na 3ª Camada.

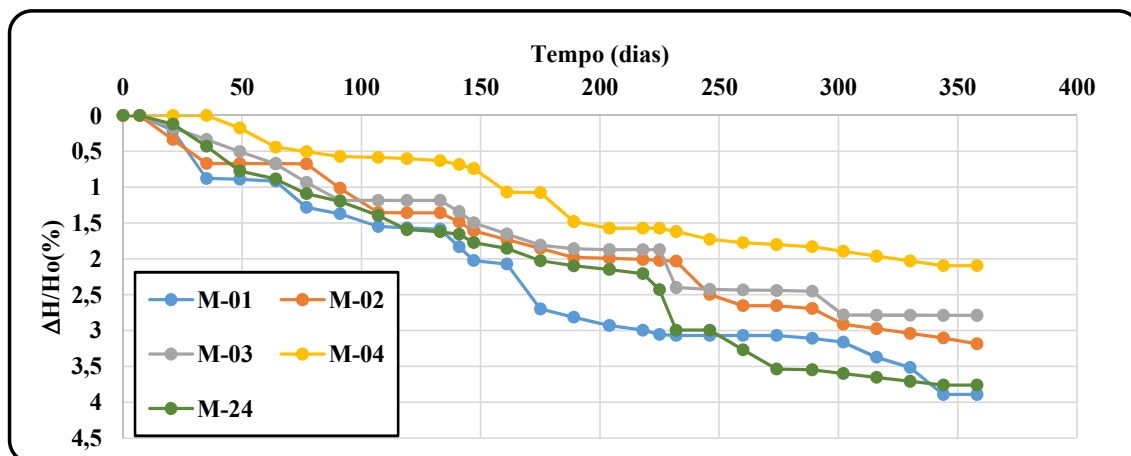
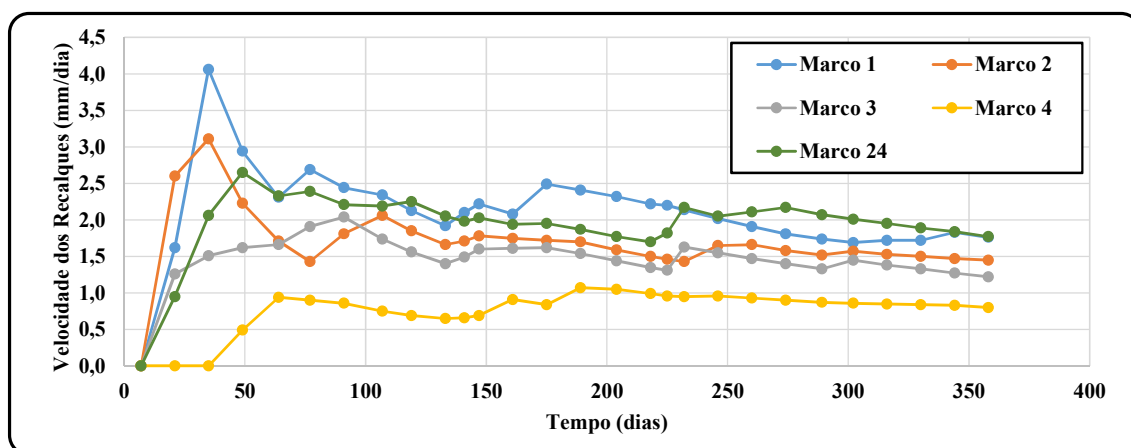


Figura 38. Velocidade dos Deslocamentos Verticais Monitorados na 3ª Camada.



As espessuras das camadas onde os marcos superficiais da terceira camada estão posicionados variam de 13,65 m a 16,83 m. A deformação específica apresentou uma variação de 2% a 4% em relação à altura inicial. Os recalques totais durante o período de monitoramento variaram entre 0,29 m e 0,63 m. O monitoramento só foi iniciado após o encerramento das operações na célula, isto é, após 120 dias da finalização da disposição dos resíduos. Por essa razão, os recalques imediatos não puderam ser medidos. Na primeira semana, não houve registro de deslocamentos verticais. Nas semanas seguintes, as velocidades dos deslocamentos variaram inicialmente de 0 mm/dia a 4 mm/dia. A partir do 80º dia, as velocidades se estabilizaram com valores entre 1 mm/dia e 2,5 mm/dia e, com o decorrer do tempo, diminuíram para menos de 2,0 mm/dia para os marcos localizados em camadas mais espessas. Conforme esperado, existe uma relação direta entre os recalques e a espessura de RSU. Sendo a camada 3 a mais jovem, com poucos

dias de diferença, observa-se uma velocidade de deformação maior em relação às outras camadas.

Na célula experimental estudada por Farias (2014), com RSU de Campina Grande/PB, após 200 dias a velocidade dos recalques variou de 0 mm/dia a 2 mm/dia, e com o tempo essa velocidade caiu para 1 mm/dia. A autora afirma que, com o passar dos dias, a velocidade de recalque diminui devido à redução da intensidade das deformações.

4.2.2. Monitoramento das Placas de Recalques

A Figura 39 representa o comportamento do recalque com o tempo, enquanto a Figura 40 representa a deformação específica da célula 2 ocorrida durante os 358 dias de monitoramento. O monitoramento do aterro em escala real apresenta algumas dificuldades em relação à operacionalidade. Isso se deve ao fato de os pontos de observação dos deslocamentos verticais só poderem ser instalados após a regularização dos taludes e bermas, e a instalação dos drenos superficiais da célula. O monitoramento dos deslocamentos da célula 2 teve início em 13 de setembro de 2016. Por esse motivo, não foi possível monitorar os recalques imediatos que ocorreram durante o processo de enchimento da célula em estudo.

Figura 39. Recalque dos RSU monitorados por meio das Placas Metálicas

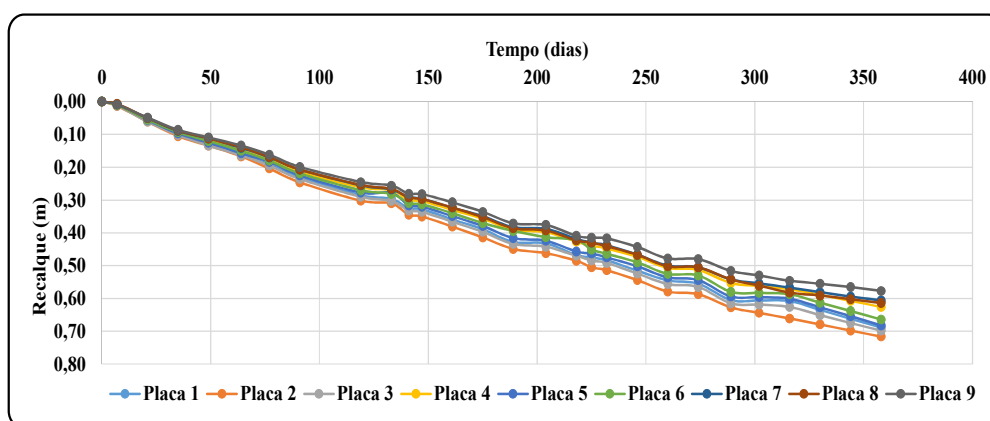
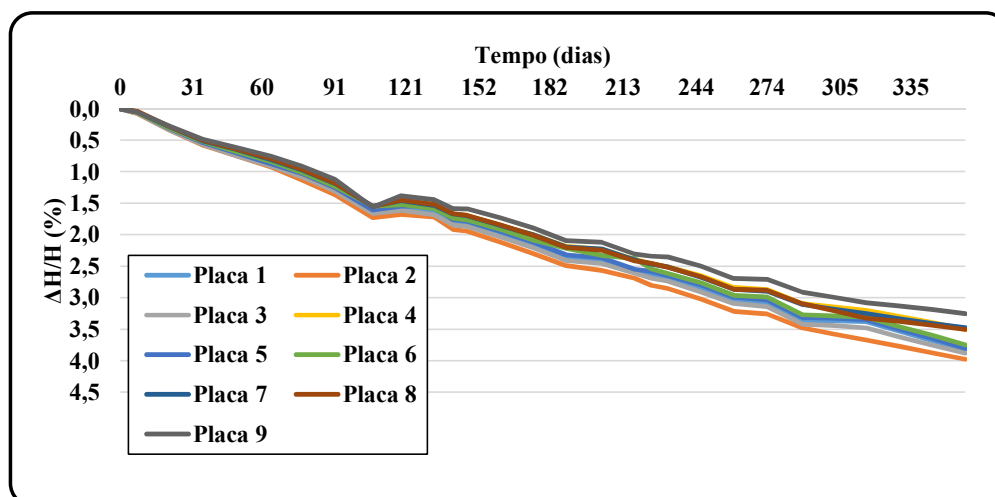


Figura 40. Deformação Específica Monitoradas por Placas de Recalque



A Tabela 18 apresenta as espessuras no início e no final de 358 dias de monitoramento. Esses dados permitem analisar a influência da espessura da camada nos recalques, bem como a variação da deformação em relação à altura inicial.

Tabela 18. Espessuras dos Pontos Monitorados por meio de placas metálicas.

PLACAS DE RECALQUE	PR - 1	PR - 2	PR - 3	PR - 4	PR - 5	PR - 6	PR - 7	PR - 8	PR - 9
Espessura Inicial (m)	17,995	18,005	17,978	17,859	17,923	17,727	17,429	17,505	17,720
Espessura Final (m)	17,305	17,285	17,278	17,233	17,241	17,063	16,823	16,891	17,143

A deformação específica das camadas é calculada pela Equação 1 e apresentada na Figura 41.

$$\varepsilon_{\%} = \frac{H_0 - H_f}{H_0} \times 100 \quad (1)$$

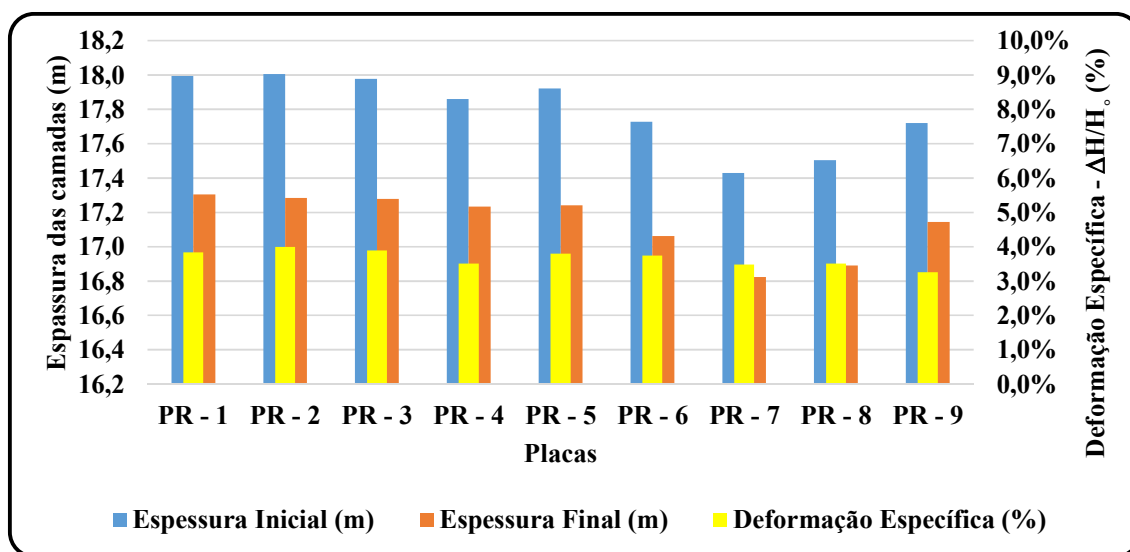
Onde: ε_0 = Deformação Específica (%);

H_0 = altura inicial;

H_f = altura final.

Na Figura 41 são apresentadas as espessuras da camada no início do monitoramento e no final do monitoramento, bem como a variação da deformação de cada ponto monitorado pelas placas.

Figura 41. Espessura inicial, Espessura final e Deformação específica da célula 2.



Observa-se que os deslocamentos verticais, monitorados por meio das placas de recalques superficiais, tiveram comportamentos semelhantes entre si durante o período de 358 dias. Nesse período, a altura das camadas variou de 0,58 m a 0,72 m, correspondendo a uma deformação de 3% a 4% em relação à altura inicial.

Quando comparadas as ocorrências dos deslocamentos verticais com outras pesquisas realizadas com os RSU de Campina Grande/PB ou com outros aterros do Nordeste, podemos ter uma referência mais confiável em relação aos recalques, já que não há referências normativas para avaliar o fenômeno.

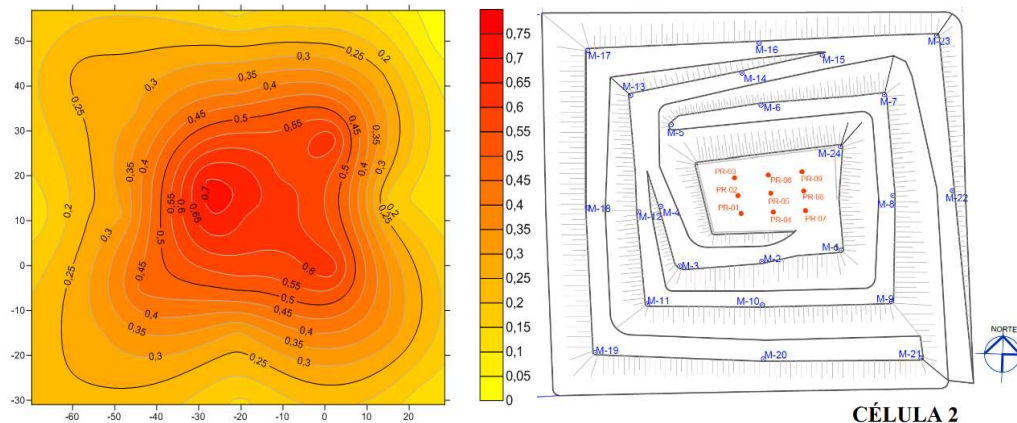
A pesquisa de Araújo Neto (2016), realizada com resíduos sólidos urbanos de Campina Grande/PB em uma célula experimental, mostra que, no 128º dia de monitoramento, a altura era de 3,05 m. Após 358 dias, a camada dessa célula apresentou uma deformação de 5 %. De acordo com a pesquisa de Melo (2003), a Célula 4 do Aterro da Muribeca/PE, no período de 350 dias de monitoramento, apresentou deformação variando entre 1,2% e 4,8% da sua altura inicial. Boscov (2008) verificou que no aterro de Bandeirante/SP, em um ano, as deformações variaram entre 0% e 7%, e a velocidade, no mesmo período, foi de 1 a 14 mm/dia. Sendo assim, os resultados do monitoramento observados na Célula 2 do Aterro Sanitário de Campina Grande/PB apresentaram valores próximos aos encontrados na literatura técnica.

O monitoramento deste período revelou velocidades de deformação pequenas, com a deformação específica alcançando um máximo de 4% nos locais de maior

espessura da camada ao longo de um ano. Tais resultados corroboram a literatura técnica, que, por meio de estudos como os de Hettiarachchi et al. (2007) e Dixon e Jones (2005), explica que as deformações em resíduos sólidos urbanos (RSU) são causadas por processos mecânicos e biológicos. Sabe-se que a fase inicial é dominada pela compressibilidade mecânica, e a fase final, por processos biológicos. A compressão secundária, por sua vez, é caracterizada por deformações lentas e graduais.

Com base em todo o resultado dos recalques monitorados a partir dos marcos superficiais e placas metálicas instalados em toda a Célula 2, foi possível elaborar Curvas de isorecalques, conforme ilustrado na Figura 42. Para a elaboração das curvas de isorecalques, utilizou-se o software SURFER, versão 13, que usa as coordenadas cartesianas para localizar os pontos de monitoramento em conjunto com os dados de recalque. Esses dados de entrada são inseridos no programa, que, por sua vez, traça automaticamente as curvas com valores de recalques semelhantes. Esse recurso permite visualizar os locais de maior incidência de recalque, o que facilita a identificação de fatores que influenciam os mecanismos responsáveis.

Figura 42. Curvas de isorecalques na célula 2 (dados em metro)



A análise das Curvas de Isorecalques demonstra que existe uma relação direta entre os recalques e a espessura das camadas. Os marcos e as placas superficiais, localizados nas camadas de maior espessura de resíduos (no centro da célula), obtiveram um maior deslocamento vertical. Por outro lado, aqueles localizados em camadas de espessura inferior apresentaram menor magnitude de recalque. A espessura da camada de resíduos é um dos fatores que contribuem para os recalques de um aterro sanitário. Isso ocorre porque uma maior espessura acarreta um maior peso e maior quantidade de matéria orgânica que pode se degradar, levando à perda de massa do maciço. De acordo com

Pereira (2000), a magnitude dos recalques em aterros de resíduos sólidos é função da decomposição da matéria orgânica e da espessura dos resíduos.

Neste período, a decomposição ocorre em um ambiente anaeróbico, sem a interferência de oxigênio, sendo caracterizado pela maior produção de metano. Os recalques ocorrem principalmente devido à ação biodegradativa, gerando vazios que, segundo Melo (2003), tendem a colapsar posteriormente.

Se o ambiente interno da massa de RSU for favorável ao desenvolvimento de microrganismos, em especial dos anaeróbios, haverá níveis de recalques elevados (LINS, 2003).

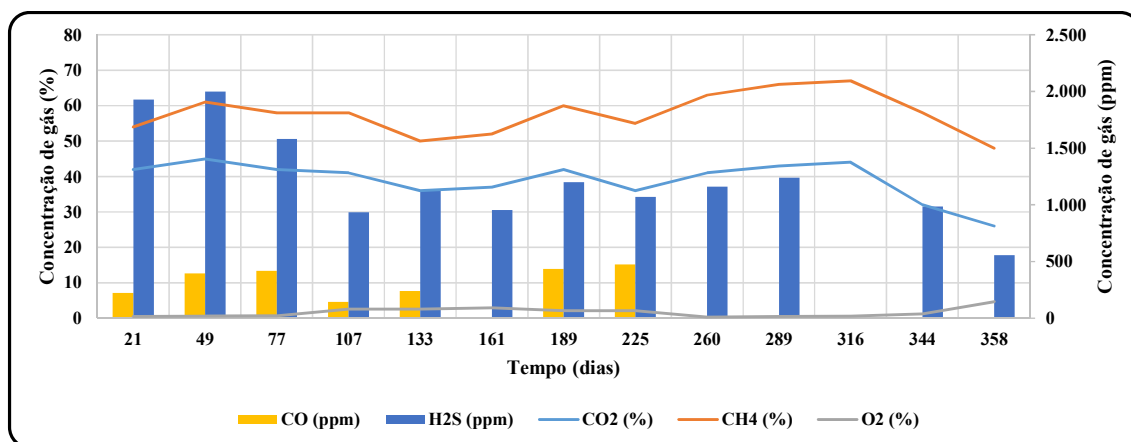
4.3. Análise das concentrações dos gases

Inicialmente, os recalques que ocorrem na massa de resíduos são devidos as solicitações de carga, ao peso próprio do maciço em conjunto com a operacionalidade contínua da passagem de veículos pesados sobre esses resíduos, como também pelo ajuste inicial da massa, porém, a continuidade da deformação do maciço é dada pela degradação biológica, e este período ocorre durante compressão secundária.

De acordo com Tapahuasco (2009), a segunda fase de deformação é caracterizada, entre outros fatores, pela dissipação de gases provenientes de processos anaeróbios.

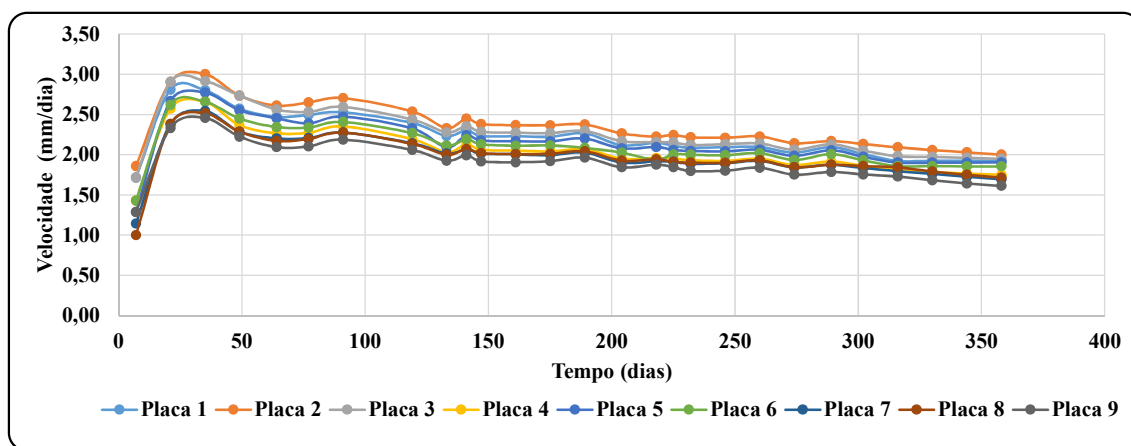
A Figura 43 apresenta as concentrações de gases monitorados nos drenos da Célula 2, durante o mesmo período de monitoramento das deformações.

Figura 43. Concentração de gases nos drenos da Célula 2.



A fase metanogênica é caracterizada pela constante produção de CH_4 e CO_2 e apresenta um período de tempo mais longo. Ao analisar o desenvolvimento dos recalques em conjunto com a qualidade dos gases que estão sendo produzidos, é possível identificar em que fase da decomposição o aterro se encontra, bem como compreender a velocidade com que os recalques ocorrem. A Figura 44 apresenta as velocidades dos recalques ao longo do tempo.

Figura 44. Velocidade dos Recalques Monitorados por meio de Placas de Recalque



Conforme ilustrado na Figura 44, as velocidades dos recalques apresentaram comportamentos semelhantes entre as placas ao longo do período de monitoramento. Por exemplo, na placa 2 (referente à camada de maior espessura), a velocidade começou em 1,86 mm/dia, aumentou para 3,0 mm/dia e, depois, decresceu com o tempo, chegando a 2,0 mm/dia no 358º dia, valor bem próximo ao inicial. Nota-se que há um período de constância na velocidade dos recalques do maciço durante todo o período de monitoramento, caracterizando a fase de compressão secundária. Conforme Tapahuasco (2009), a segunda fase da deformação é provocada pelos mecanismos de creep (deformação lenta das partículas de RSU) e ravinamento, pela redução dos vazios dos microporos em alguns elementos de RSU (principalmente materiais orgânicos), e pela dissipação dos gases e líquidos que compõem esses materiais.

Na Figura 43, as leituras das concentrações de gases se mantiveram com um pequeno intervalo de variação, o que aponta para uma ação metabólica constante. As concentrações de CH_4 , na faixa de 50% a 67%, foram superiores às de CO_2 , caracterizando, assim, a fase metanogênica de degradação. Estas elevadas concentrações de CO_2 e CH_4 corroboram os processos de deformação secundária da Célula em estudo.

No período da compressão secundária, as ações metabólicas dos microrganismos convertem a matéria orgânica em líquidos e gases. A drenagem desses líquidos e gases gera vazios que colapsam devido ao peso próprio do maciço. De acordo com Melo (2003), esse comportamento é decorrente da ação biodegradativa da matéria orgânica, que proporciona um aumento dos vazios entre as partículas de resíduos. Esses vazios se expandem até atingirem o limite em que conseguem suportar a carga imposta pelo peso próprio do maciço. Após o período de recalque intenso, inicia-se o período de recalque zero. Ainda segundo o mesmo autor, neste período, ocorre uma degradação da matéria orgânica com aumento dos vazios. No entanto, quando as tensões impostas pela massa de resíduo forem suficientemente grandes para colapsar esses vazios, ocorrerão novos recalques.

4.4.Influência do Clima nos Recalques

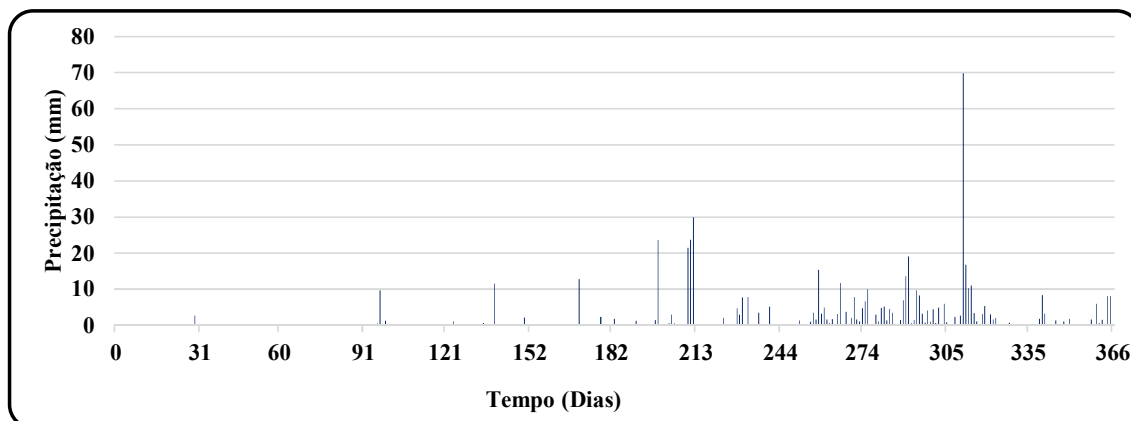
Os recalques secundários em aterros sanitários são consequência da degradação microbiana, e qualquer fator que interfira na biota microbiana afeta diretamente esse processo. Além disso, a precipitação também é um fator que influencia nas deformações verticais. Períodos de maiores precipitações podem, por exemplo, causar uma possível desestabilização do maciço sanitário, independentemente da fase de degradação.

Segundo Junqueira (2000), a água das chuvas carrega oxigênio dissolvido. Conforme Melo (2003), a taxa de oxigênio na chuva é de 7 a 14 mg/L. Sendo assim, a intensidade das chuvas pode interferir tanto na entrada de oxigênio, comprometendo a degradação microbiana em ambiente anaeróbio, quanto causar um aumento no teor de umidade, estimulando a biodegradação. Além disso, o aumento da umidade do maciço de resíduos provoca um acréscimo de cargas, o que contribui para a ocorrência de recalques mecânicos acentuados.

Na Figura 45, são ilustrados os dados de precipitação diária, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (2017), durante o período de monitoramento.

O aterro sanitário de Campina Grande encontra-se na região oeste da cidade, onde o clima quente favorece a vegetação rasteira da caatinga. As condições climáticas na cidade de Campina Grande/PB indicam um quadro de déficit hídrico, pois a evaporação supera a precipitação.

Figura 45. Quantidade de chuvas no período do monitoramento.



Fonte: INMET (2017)

A Figura 45 apresenta os dados de precipitação diária durante o período de monitoramento, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2017). O acúmulo de chuvas atingiu 564,3 mm, um valor inferior à média de 764,3 mm, que corresponde aos dados históricos de precipitação anual acumulada dos últimos 30 anos (AESAs, 2017).

Durante o monitoramento, a velocidade do recalque se manteve constante. O longo período de estiagem não trouxe variações nem interferências diretas nos processos biodegradativos e, conseqüentemente, não houve acréscimo de carga ou desestabilização do meio, que seriam causados por precipitações significativas. Segundo Melo (2011), o déficit hídrico pode afetar as camadas superiores, diminuindo a umidade e desacelerando o processo degradativo, o que impacta negativamente nos recalques.

5. Conclusões

Com base nas análises do desenvolvimento dos recalques e nas leituras das concentrações de gases em toda a Célula 2 do aterro sanitário de Campina Grande/PB, foi possível identificar a fase de decomposição em que o maciço se encontra e qual é o principal processo responsável pelos recalques durante o monitoramento. Assim, pode-se concluir que:

- ✓ Os deslocamentos ocorridos durante todo o período de monitoramento da Célula 2 apresentaram uma relação direta com as espessuras das camadas de resíduos aterrados, ou seja, maiores espessuras correspondem a maiores recalques.
- ✓ A velocidade do recalque, que se manteve constante tanto nos marcos quanto nas placas superficiais após sua acomodação, variou de 0,5 mm/dia a 2 mm/dia. Segundo a bibliografia técnica, essa é uma velocidade aceitável.
- ✓ O total de precipitação acumulado durante o período de monitoramento foi inferior ao esperado, indicando uma precipitação reduzida e, por consequência, não trouxe alterações nos recalques ocorridos na célula 2 ao longo do monitoramento.
- ✓ As deformações que ocorreram na célula 2, variando entre 1,7% e 4% durante o período de monitoramento, apresentaram um comportamento típico de compressão secundária. Esse resultado é apoiado pelas concentrações de gases provenientes dos processos anaeróbios, que indicam a fase metanogênica de degradação e apontam para intensos processos biodegradativos.
- ✓ Observa-se que a influência da ação biodegradativa dos componentes de fácil degradação passa a ser a principal responsável pela deformação em um aterro sanitário ao longo do tempo.
- ✓ Após a acomodação do maciço, imposta pelo peso próprio do aterro, a influência mecânica é reduzida ao longo do tempo. Sua continuidade dependerá da redução da massa, consumida por microrganismos, que gera vazios. Esses vazios se expandem até um limite determinado, quando suportam a carga imposta pelo próprio resíduo.

6. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos Sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004^a 74p.

_____. NBR 11.682: Estabilidade de Encostas - Rio de Janeiro, 2009. 33p.

_____. NBR 7181-: Solo - análise granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016. 13p.

_____. NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1996. 7p.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016**. São Paulo, 2016. 60p.

_____. – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2010**. São Paulo, 2010. 200p.

_____. – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2008**. São Paulo, 2008. 208p.

ABREU, R. L. Localização de Campina Grande/PB. (2017). Wikipédia, a enciclopédia livre. Disponível em; <<https://pt.wikipedia.org/wiki/>>. Campina Grande/PB. Acesso em 12/10/2017.

AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. Meteorologia. Monitoramento. AESA, out. 2017. Disponível em <<http://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/medicaoPluviometrica.do?metodo=listarClimatologiasMensais>>. Acesso em: 03/10/2017.

AIRES, K. O. **Monitoramento das concentrações de gases em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos na cidade de Campina Grande-PB**. 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 2013.

ALCÂNTARA, P. B. Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ANTUNES, V. Aterro Sanitário de Aparecida de Goiânia/GO. Mais Notícia, 9 de maio de 2017. Disponível em: <<http://www.aparecida.go.gov.br/sistema-de-drenagem-e-captacao-de-chorume-e-construido-no-aterro-de-aparecida/>>. Acesso em 12 de outubro de 2017.

ARAUJO NETO, C. L. **Análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento de modelos estatísticos para a previsão das deformações de aterros sanitários.** 2016. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil e ambiental) – CTRN (centro de tecnologia de recursos naturais) da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande), Campina Grande-PB, 2016.

AUDIBERT, J. L. **Avaliação qualitativa e quantitativa do biogás do aterro controlado de Londrina.** Universidade Estadual de Londrina. 2011. 186 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento). Universidade Estadual de Londrina, Paraná.

BORGATTO, A. V. A. **Estudo das Propriedades Geomecânicas de Resíduos Sólidos Urbanos Pré-tratados.** 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Lex: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS: Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental.** Oficina de Textos, 2008.

CARVALHO, A. R. **Desenvolvimento de um Equipamento para a Determinação de Parâmetros Geotécnicos de Resíduos Sólidos.** 2006. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 2006.

- CATAPRETA, C. A. C. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação**. 2008. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2008.
- CONAMA. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. 1993. RESOLUÇÃO CONAMA nº 5, de 5 de agosto de 1993 Publicada no DOU no 166, de 31 de agosto de 1993, Seção 1, p. 595. 1993.
- DEFRA – DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT FOOD & RURAL AFFAIRS. **Waste composition analysis: guidance for local authorities**. London, 2004.
- DENARDIN, G. P. (2013). **Estudo dos Recalques do Aterro Sanitário da central de resíduos do recreio – Minas do Leão/Rs**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, pp. 93. Santa Maria/RS.
- DIXON, N.; JONES, D. R. V. Engineering properties of municipal solid waste. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 23, n. 3, p. 205-233, 2005.
- DURMUSOGLU , E., Corapcioglu, M. Y. & Tuncay, K. 2005. Landfill settlement with decomposition and gas generation. **Journal of Environmental Engineering**, 131, 1311-1321 (2005).
- EBAH – Rede Social Acadêmica. **Projeto básico de aterro**. Acesso em 4/06/2017. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAEleIAJ/projeto-basico-aterro?part=2>>.
- FARIAS, R. M. de S. **Estudo dos Recalques em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Estatística e Experimental**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB.

FERREIRA, M.A.S.; MAHLER, C.F. **Avaliação do Solo das Camadas de Cobertura Intermediárias e Finais Estudo de Caso**. IZZO, R.L.S.; BORGATTO, A.; MAHLER, C.F. Classificação de resíduos sólidos urbanos da cidade do rio de janeiro utilizando a norma alemã E1-7 GDA. 2006.

GANDOLLA, M.; DUGNANI, L.; BRESSI, G.; ACAIA, C. (1994). Determinação dos Efeitos do Recalque sobre os Depósitos de Lixo Solido Municipal. **Simpósio Internacional de Destinação do Lixo**, novembro, 1994, Salvador, p.191 – 211.

GOOGLE MAPS. Imagem do Aterro de Campina Grande. Acesso em 12/10/2017;

GOMES, N. A.; SILVA, M^a E.; ALMEIDA, M.V. A.; VIEIRA, E. M. S. 2017. Estudo Comparativo da caracterização físico-química de resíduos sólidos urbanos e Lixiviado de Aterro Sanitário. **8º Simpósio Internacional Sobre Gerenciamento de Resíduos em Universidades**. Outubro de 2017. V. 2, n. 47, pp. 202 - 205. 2017

GRISOLIA, M. & NAPOLEONI, Q (1996) Geotechnical Characterization of Municipal Solid Waste: Choice of Design Parameters. Proc of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, A.A.Balkema, 5-8 November, v.2, pp. 642-646.

HETTIARACHCHI, C. H., MEEGODA, J. N., TAVANTZIS, J., & HETTIARATCHI, P. Numerical model to predict settlements coupled with landfill gas pressure in bioreactor landfills. Journal of hazardous materials, v. 139, n. 3, p. 514-522, 2007.

HUSE, K. Estudo da Influência da Adição de Bentonita em um Solo Areno-Siltoso para Uso como Cobertura de Aterros. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro – RJ, 2007.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais,

Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 1989, 2000 e 2008. Disponível em <<https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/0000000105.pdf>> Acesso em: 22 de setembro de 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades. População estimada em 2017 do município de Campina Grande/PB. Disponível em <<http://cidades.ibge.gov.br/v3/cidades/municipio/2504009>>. Acesso em: 03 fev. 2018.

IMA - Instituto do Meio Ambiente. Notícia em 22 de Novembro de 2016. Disponível em: <<http://www.alagoas24horas.com.br/1016453/ima-alerta-novos-prefeitos-sobre-o-problema-dos-lixoes-ceu-aberto/>>. Acesso em 10 de Dezembro de 2017.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em 26 setembro de 2017.

JESSBERGER, H. L. (1994). Geotechnical Aspects of landfill Design and Construction. Part 1: Principles and Requirements. Proc. Instn Civ. Engrs Geotechnical. Engineering, V.107, p: 99 -104.

JUCÁ, J. F. T., MARIANO, M. O. H., MELO, V. L. A. **Recalques e decomposição da matéria orgânica em aterros de resíduos sólidos na região metropolitana do Recife**. Em: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

JUNQUEIRA, F. F. **“Análise do Comportamento de Resíduos Urbanos e Sistemas Dreno Filtrantes em Diferentes Escalas, com Referência ao Aterro do Jôquei Clube – Df. Tese de Doutorado”**, Universidade de Brasília, pp. 283, Brasília, DF. (2000).

KAVAZANJIAN, E.; MATASOVIC, N; BONAPARTE, R; SCHMERTMAM, G.R. (1995). Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis:

Geoenvironmental 2000. ASCE Geot. Spec. Pub. New Orleans, v.2, n.46, p. 1126-1142, 1995.

LEITE, H. E. A. S. **Estudo do comportamento de aterros de RSU em um biorreator em escala experimental na cidade de Campina Grande - PB.** 2008. 220p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB.

LINS, E. A. M. A. (2003). **Utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro de Muribeca.** Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco/PE.

LINO, I. C. (2007). **Seleção de área para implantação de aterros sanitários: Análise comparativa de métodos.** Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente – Universidade Estadual Paulista. Rio Claro – SP, 2007.

LOPES, M. L.; GOMES, C. C. **Problemas Relativos á Estabilidade de Aterro de Resíduos.** 2000. In: Seminários Sobre Aspectos Geotécnicos do Projeto e Construção de Aterros de Resíduos. Sociedade Portuguesa de Geotecnia. Lisboa.

MACIEL, F. J. Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos. 2009. 354 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MARIANO, M^a. O. H. (1999). Recalques no aterro de resíduos Sólidos da Muribeca-PE. 1999. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco/PE.

MARQUES, A. C. M. Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos. 267 p. 2001. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de São Paulo, São Paulo.

- MCDUGALL, J.R.; PYRAH, I.C.; YUEN, S.T.S.; MONTEIRO, V.E.D.; MELO, M.C.; JUCA, J.F.T. (2004) Decomposition and settlement in landfilled waste & other soil-like materials. *Geotechnique*, v. 54, n. 9, p. 605-610.
- MELO, M. C. **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.
- MELO, M. C. **Influência da Matéria Orgânica nos Recalques de Resíduos Sólidos Urbanos Aterrados**. 2011. 148 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.
- MELO, M. C. de; AIRES, K. O.; ALMEIDA, M. V de Araújo; MONTEIRO, Verusckha Escarião Dessoles. **Microbiologia de resíduos sólidos urbanos e sua relação com a deformação vertical da massa aterrada**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, 2014.
- MONTEIRO, V.E.D. Análises Físicas, Químicas e Biológicas no Estudo do Comportamento do Aterro da Muribeca. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife PE, pp. 1-232. 2003.
- MOTTA, E. Q. Avaliação da Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos com Codisposição de Lodo de Tratamento de Esgoto através de Ensaio de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões. 2011. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2011.
- NASCIMENTO, J. C. F. (2007). “Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos”. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo - USP, São Carlos-SP, 2007.

- OLIVEIRA, D. A. F. Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade de Brasília – UnB. Brasília-DF.
- OLIVEIRA, F. J. P. (1996). Geotechnical Problems & Solutions for Design & Operation of a Landfill of Municipal Waste. Proceedings of the Fourth International Conference. London.
- OLIVIER, F. & GOURC, J. (2007) Hydro-mechanical Behavior of Municipal Solid Waste Subject to Leachate Recirculation in a Large-Scale Compression Reactor Cell. Waste Management. V. 27, n. 4, pp. 40-58.
- PALMA, J. H. (1995). “Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos”. Tesis Doctoral. ETSCCP, Universidad de Cantabria. España.
- PECORA, V.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G. COELHO, S. T. **Aproveitamento do biogás proveniente de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação à gás.** Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- PEDRONI, B. Aterro sanitário em São Paulo impermeabilizado pela TDM Brasil. Geosynthetica, notícia em 16 de junho de 2015. São Paulo/SP. Disponível em <<http://geosynthetica.net.br/tdm-caso-de-obra-aterro-sanitario/>>. Acesso em: 22 de outubro de 2017.
- PNSB - PESQUISA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO. 2008. Rio de Janeiro, 2010.
- PMGIRS - PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Diagnóstico da situação atual dos Resíduos Sólidos Urbanos (2014).** Campina Grande/PB, pp. 290. Disponível em <http://sesuma.org.br/estudos/Diagnostico_2204_VF.pdf>. Acesso em 10/10/2017.

- ROCHA, A. A. A.; ABREU, A. E. S.; OLIVEIRA, F. J. P.; KAMIJI, T. S. M. M. (2016). Níveis de Alerta para Monitoramento de Aterros Sanitários Encerrados. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **COBRAMSEG 2016**. Belo Horizonte, Minas Gerais, 19-22 Outubro de 2016.
- SANTOS, L. A. & PRESA, E. P. (1995) Compressibilidade de Aterros Sanitários Controlados. III Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos REGEO'95, v.II, Ouro Preto.
- SCHALCH, V.; LEITE, W. C. de A.; FERNANDES JUNIOR, J. L.; CASTRO, M. C. A. A. Gestão e Gerenciamento dos Resíduos Sólidos. São Carlos (SC), 2002. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento da USP.
- SEPLAM – Secretaria de Planejamento de Campina Grande – PB. Disponível em: <<http://www.observacampina.com/sigcg/index.html>>. Acesso em: 10 outubro de 2017
- SOARES, E. L. de S. F. Estudo da Caracterização Gravimétrica e Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Dissertação (mestrado) – Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.
- TAPAHUASCO, W. F. C. **Análise do comportamento de maciços sanitários e proposta de um novo modelo de previsão de recalques considerando a parcela de biodegradação**. 2009. Tese de doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil, pp. 161. – Distrito Federal – DF, 2009.
- TEIXEIRA M. C. (2015) - Previsão e Monitoramento de Recalques em Aterros Sanitários/ Estudo de Casos: Central de Resíduos de Recreio – Dissertação de mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, pp. 217. Minas do Leão/RS e São Leopoldo/RS

VILHENA, A. (Coord.) Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado. São Paulo. E. CEMPRE, 2010.

WIEMER, K. (1982) Qualitative und Quantitative Kriterien zur Bestimmung der Dichte von Abfällen in Geordneten Deponien. Dissertation, TU Berlin.