



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
ÁREA GEOTÉCNICA

ANÁLISE MULTIVARIADA NO COMPORTAMENTO DOS RECALQUES
EM CÉLULA EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Rômulo de Medeiros Caribé

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro de 2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
ÁREA GEOTÉCNICA

ANÁLISE MULTIVARIADA NO COMPORTAMENTO DOS RECALQUES
EM CÉLULA EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Rômulo de Medeiros Caribé

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro de 2015

**ANÁLISE MULTIVARIADA NO COMPORTAMENTO DOS
RECALQUES EM CÉLULA EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS**

Rômulo de Medeiros Caribé

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Área de Concentração – Geotécnica

Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles de Monteiro

Orientadora

Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo

Orientador

Prof. Dr. William de Paiva

Orientador

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro de 2015

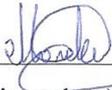
FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Rômulo de Medeiros Caribé

Título: Análise Multivariada no Comportamento dos Recalques em Célula Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos

Dissertação defendida e aprovada em: 23 / 02 / 2015

Pela Banca Examinadora

(Assinatura):  _____

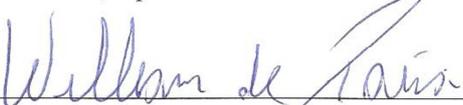
Prof. Dra. (Orientadora) Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura):  _____

Prof. Dr. (Co-orientador) Márcio Camargo de Melo

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura):  _____

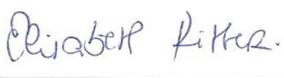
Prof. Dr. (Co-orientador) William de Paiva

Universidade Estadual da Paraíba – UEPB

(Assinatura):  _____

Prof. Dr. (Examinador interno) Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura):  _____

Prof. Dra. (Examinadora externa) Elisabeth Ritter

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C277a Caribé, Rômulo de Medeiros.

Análise multivariada no comportamento dos recalques em célula experimental de resíduos sólidos urbanos / Rômulo de Medeiros Caribé. – Campina Grande, 2015.

99 f. : il. Color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2015.

"Orientação: Prof.^a Dr.^a Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo, Prof. Dr. William de Paiva".

Referências.

1. Resíduos Sólidos Orgânicos. 2. Célula Experimental. 3. Recalques. I. Monteiro, Veruschka Escarião Dessoles. II. Melo, Márcio Camargo de. III. Paiva, William de. IV. Título.

CDU 628.4.042(043)

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Raimundo Caribé Filho, a minha mãe Maria Elizabete de Medeiros Caribé, pela compreensão por minha ausência nas reuniões familiares.

A professora Dra Veruschka Escarião Dessoles Monteiro pelas leituras sugeridas ao longo dessa orientação e pela dedicação.

Aos professores Dr. Marcio Camargo Melo e Dr. William de Paiva de Monteiro e, pela confiança depositada em mim e pelas inúmeras colaborações durante todo o desenvolvimento desta dissertação.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, que contribuíram ao longo de um ano, por meio das disciplinas e debates, para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos integrantes do Grupo Geotecnia Ambiental (GGA) que sempre tiveram consideração e participaram dos resultados obtidos neste trabalho, pois sem esta ajuda este estudo não seria possível e não teria o mesmo significado e importância.

Em especial, a minha namorada, companheira e amiga, Viviane Guedes Gonçalves de Moura, muito obrigado pela força e por várias contribuições nesta etapa final.

Ao convênio CAPES pelo apoio financeiro que, sem dúvida, foi determinante para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

Demais amigos, colegas de mestrado e de trabalho, muito obrigado por acreditarem em mim e sempre me incentivarem.

CARIBÉ, R. M. **Análise Multivariada no Comportamento dos Recalques em Célula Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2015. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – Geotecnia) – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

RESUMO

Recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos podem ser definidos como deslocamentos verticais descendentes da massa de resíduos. Desta forma, problemas que envolvem operações, estabilidade e deformabilidade são frequentes em aterros sanitários, na maioria das vezes, ocorrem devido a elevados teores de matéria orgânica presentes em sua massa de resíduos. Estas questões podem ser bem mais compreendidas se estudadas em células experimentais de RSU, que simulam o comportamento de um aterro, construídas sob condições conhecidas e/ou controladas. Deve-se salientar que os recalques em aterros são complexos, pois existem um grande número de variáveis que estão atreladas direta e indiretamente com este mecanismo. Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento dos recalques associados a aspectos geotécnicos, físico-químicos e microbiológicos em uma célula experimental de Resíduos Sólidos Urbanos utilizando uma ferramenta da Análise Multivariada. A metodologia consistiu na construção, instrumentação e enchimento de uma Célula Experimental de 9m³ com resíduos sólidos urbanos e os recalques foram analisados quanto a aspectos estatísticos e suas correlações com os parâmetros físico-químicos e microbiológicos. O estudo estatístico multivariável em componentes principais foi realizado, inicialmente, com a geração de uma matriz de correlação com todas as variáveis envolvidas no processo e divididas por camadas para verificar o nível de relação entre as variáveis. Foram feitos também, estudos de composição gravimétrica e volumétrica dos RSU, que puderam auxiliar na quantificação da matéria orgânica degradada ao longo da pesquisa. Conforme os resultados analisados pôde-se observar que a camada superior de resíduos obteve melhor desempenho quanto à atividade microbiana, recalques e degradações da matéria orgânica, o que justifica a concepção de aterros não isolados do meio externo. Através dos estudos verificou-se que a quantidade de matéria orgânica diminuiu acentuadamente em todos os níveis pesquisados e, que os recalques devido a estes compostos e a fatores mecânicos (carga imposta dos próprios resíduos) se mostraram variáveis de acordo com a profundidade. Concluiu-se que os parâmetros estudados influenciaram os recalques ocorridos na Célula Experimental.

Palavras chaves: Resíduos Sólidos Urbanos, Célula Experimental, Recalques.

CARIBÉ, R. M. **Multivariate analysis in behavior of settlements in experimental cell of municipal solid waste.** 2015. 99 f. Dissertation (Mastering in Environmental and Civil Engineering) – Federal University of Campina Grande – UFCG.

ABSTRACT

The settlements in solid municipal waste landfills are defined as vertical downward displacements of the waste. Thus, Problems involving operations, stability and deformability are frequent in landfills. They are often caused by high levels of organic matter present in the waste mass. These factors can be more accurately analyzed if studied in an MSW experimental cell because it can simulate landfill behavior in a known and/or controlled conditions. . It is important to emphasize that the situation of these settlements in landfills is complex due to the large number of variables that are linked - directly or indirectly - to this mechanism. The aim of this study was to investigate the behavior of settlements associated with geotechnical, physical, chemical and microbiological aspects in an experimental cell of municipal solid waste using a Multivariate Analysis tool. The methodology consisted in the construction, instrumentation and filling of a 9 m³ experimental Cell with USW and the analysis of settlements for statistical aspects and their correlations with physic-chemical and microbiological parameters. The multivariate statistical analysis on principal components was performed initially by generating a correlation matrix with all the variables involved in the process and those were divided into layers to check the level of relationship between them. The MSWs gravimetric and volumetric composition were also done in order to help with the quantification of degraded organic matter throughout the present research. According to the analyzed results, it was observed that the upper layer of waste obtained a better performance in terms of microbial activity, settlements and degradation of organic matter. The anlysis indicated the amount of organic matter decreased drastically in all researched levels and settlements varied according to the depht in the cell due to mechanic factors and cell's compounds. We concluded that the studied parameter influenced the settlements in the experimental cell.

Keywords: Statistical analysis; Environmental engineering; Landfills; Settlement

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos resíduos sólidos urbanos segundo a sua origem.	16
Figura 2 - Fases dos RSU em aterros sanitário.	21
Figura 3 - Seção típica de um aterro sanitário.	23
Figura 4 - Modelo dos recalques em aterros sanitários de RSU.	26
Figura 5 - Representação gráfica das componentes principais.	36
Figura 6 - Matriz de dimensão n x m	36
Figura 7 - Screenshot.	27
 ARTIGO 1:	 pág.
Figura 1 - Vista superior e corte vertical da célula experimental de RSU	45
Figura 2 - Recalques superficiais e em diferentes profundidades e ao longo do tempo	50
Figura 3 - Velocidade dos recalques superficiais e em diferentes profundidades ao longo do tempo	53
Figura 4 - Recalques versus Sólidos Voláteis (camada superior)	56
Figura 5 - Recalques versus Sólidos voláteis (camada intermediária)	56
Figura 6 - Recalques versus Sólidos voláteis (camada inferior)	57
 ARTIGO 2:	
Figura 1. Localização geográfica da cidade de Campina Grande – PB	69
Figura 2. Vista superior e corte vertical da célula experimental de RSU.	70
Figura 3. Análise das componentes principais - camada superior.	76
Figura 4. Análise das componentes principais - camada intermediária	78
Figura 5. Análise das componentes principais - camada inferior.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição gravimétrica de RSU em cidade do Brasil.	20
Tabela 2- Deformações específicas em aterros	28
ARTIGO 1:	pág
Tabela 1 - Valores obtidos por meio da caracterização física dos RSU	47
Tabela 2 - Posição das placas de recalques no interior da célula experimental	50
Tabela 3 - Recalques observados nas placas durante o tempo de monitoramento da célula experimental	51
Tabela 4 - Percentagens de recalques devido ao peso próprio de RSU e a degradação da matéria orgânica	52
Tabela 5 - Quantidade de Matéria Orgânica (MO) por extrato de RSU.....	56
Tabela 6 - Quantidade da Matéria Orgânica (MO) inicial e transformada em outros constituintes	59
Tabela 7 - Variação da altura e de quantidade de rsu no tempo e na profundidade	60
ARTIGO 2:	
Tabela 1 - Análise descritiva dos principais parâmetros associados aos recalques - camada superior	72
Tabela 2 - Análise descritiva dos principais parâmetros associados aos recalques -camada intermediária.....	73
Tabela 3 - Análise descritiva dos principais parâmetros associados aos recalques –camada inferior	74

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	12
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo Geral	14
1.1.1 Objetivos Específicos	15
CAPÍTULO 2	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 Resíduos Sólidos Urbanos	15
2.1.1 Composições gravimétrica e volumétrica	20
2.1.2 Fases presentes nos RSU	21
2.2 Aspectos gerais de aterros sanitários.....	22
2.2.1 Células Experimentais de RSU	24
2.2.2 Estudos dos recalques.....	25
2.2.3 Processos degradativos.....	28
2.2.4 Propriedades físico-químicas.....	31
2.2.5 Propriedades microbiológicas	32
2.3 Estatística Multivariada.....	34
2.3.1 Análise de Componentes Principais (ACP)	35
CAPÍTULO 3	39
3.1 ARTIGO Nº1: Estudo da matéria orgânica nos recalques de resíduos sólidos urbanos aterrados	40
Introdução.....	41
Revisão Bibliográfica.....	41
Recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos	41
Composição gravimétrica e volumétrica de resíduos sólidos urbanos	43
Materiais e Métodos.....	44
Desenvolvimento da pesquisa.....	44
Construção do lisímetro	44
Coleta, amostragem de resíduos e enchimento da células experimental	45
Monitoramento das mediações em campo e realização de ensaios de laboratório.....	46
Resultados e Discussões	47
Caracterização física dos resíduos sólidos depositados na célula experimental.....	46
Recalques	48
Recalques por placas.....	48

Porcentagem dos recalques por placas	51
Recalques x matéria orgânica	54
Conclusões.....	60
Referências	62
3.2 ARTIGO N°2: Análise multivariada no comportamento dos recalques em resíduos sólidos urbanos.....	66
Introdução	67
Metodologia	69
Coleta e enchimento da célula experimental	70
Medições <i>in situ</i> e Realização de Ensaios de Laboratório	71
Análise Estatística.....	71
Resultados e Discussões	72
Análise de Componentes Principais (ACP)	75
Conclusões	80
Referências.....	80
CONCLUSÃO GERAL.....	84
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	86
APÊNDICES	96

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Em aterros de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é comum, ao longo do tempo, a massa destes resíduos sofrer grandes deformações, tanto no sentido vertical como no horizontal. O estudo dos recalques em aterros de RSU, diferentemente dos que ocorrem em solos, pode ser definido como deslocamentos verticais descendentes da massa de resíduos, provocados principalmente por perda de massa e, redução de volume. Deve-se deixar claro que a redução de volume e altura de aterros é também influenciada por cargas externas, peso próprio dos resíduos e/ou camada de cobertura.

Estudar os recalques em aterros sanitários é de grande interesse para engenharia geotécnica ambiental, visto que possibilitam diversas vantagens como uma maior quantidade de resíduos a ser armazenada e taxa de produção de biogás, aceleração da estabilidade dos aterros e redução de gastos operacionais em curto e longo prazo (ABICHOU et al., 2013).

Conforme Schuler (2010), as grandes metrópoles sofrem na adequação de áreas para disposição dos resíduos, o que exige melhorar a capacidade de comportar mais resíduos em aterros sanitários, refletindo em alturas cada vez maiores, o que caracteriza em maiores volumes de obras de engenharia. Desta forma, os aterros de RSU, apesar de ser uma obra geotécnica sempre foram considerados obras de cunho sanitário, muitas vezes, sem levar em consideração problemas geotécnicos como estabilidade de taludes, impermeabilização de camadas base e cobertura e, principalmente, recalques.

A previsão de recalques em aterros sanitários está ligada, entre outros parâmetros, com processos biodegradativos que consiste na modificação física ou química destes resíduos, causada pela ação de microrganismos, sob certas condições de calor, umidade, radiação solar, oxigênio, nutrientes orgânicos e minerais adequados (TIGHE et al., 1998). O aspecto degradativo torna-se um fator fundamental na estabilidade de um aterro, já que grandes quantidades de resíduos são biodegradáveis, principalmente, os constituintes orgânicos. A matéria orgânica, ainda, representa mais de 50% na participação total de RSU coletado no

Brasil de acordo com ABRELPE (2013) e por isso a quantidade de matéria orgânica é determinante nos recalques.

A disposição final dos RSU exige dos gestores, além da atenção na composição dos resíduos, uma maneira adequada na sua acomodação através do controle de compactação evitando instabilidades em aterros. Fucale (2002) e Cardim (2008) sugerem, inclusive que determinados resíduos, como o plástico, por exemplo, pode conferir maior estabilidade nos resíduos. Assim, o tipo de resíduo pode ser aliado na configuração de aterros. Além disso, o monitoramento de parâmetros como os físico-químicos, microbiológicos e geotécnicos devem ser compreendidos, interpretados e correlacionados para uma boa gestão em aterros.

Segundo Neto (2013), estabelecer relações, encontrar, ou propor leis explicativas, é papel próprio da ciência, no entanto é necessário controlar, manipular e medir as variáveis que são consideradas relevantes ao entendimento do fenômeno analisado.

A Análise de Componentes Principais (ACP) é um dos métodos estatísticos de Análise Multivariada que representa uma ferramenta extremamente importante para o entendimento do comportamento de fenômenos através de formação de grupos de variáveis que podem explicá-lo.

No caso de aterros sanitários, o monitoramento de sólidos, líquidos e gases envolvem grande número de variáveis durante sua vida útil, portanto, a ACP pode e têm sido utilizadas com sucesso para apoiar pesquisas relacionadas à gestão de resíduos sólidos e extrair informações significativas (LI et al., 2014; NOORI et al., 2009). Além disso, esta ferramenta é largamente utilizada pela comunidade científica no reconhecimento de padrões e compreensão de sistemas (WILKS, 2011). Esta técnica possibilita reduzir o número de variáveis para fornecer uma visão estatisticamente privilegiada de um conjunto de dados. Desta forma a Análise Multivariada de dados pode dar suporte na compreensão de questões relacionadas ao comportamento de Aterros de RSU e, principalmente, recalques.

Para se entender melhor o comportamento de Aterros de RSU, estudos são realizados em escalas menores ou em nível experimental a fim de simular aterros em escala real. Para tanto foi construída uma Célula Experimental instrumentada que simula um aterro em escala real nas dependências físicas da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), no município de Campina Grande-PB, sendo monitorada durante o período de mais de um ano.

1.1 Objetivo Geral

Estudar o comportamento dos recalques associados a aspectos geotécnicos, físico-químicos e microbiológicos em uma célula experimental de Resíduos Sólidos Urbanos utilizando uma ferramenta da Análise Multivariada.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Caracterizar os resíduos sólidos depositados na célula experimental através de análises de parâmetros físico-químicos e microbiológicos;
- Estudar o comportamento da matéria orgânica biodegradável no tempo e em profundidade e relacioná-la aos parâmetros físico-químicos, microbiológicos e a magnitude dos recalques ocorridos em uma Célula Experimental;
- Analisar os dados provenientes do monitoramento da célula experimental, através da Análise de Componentes Principais para a formação de grupos de variáveis que influenciam diretamente na evolução dos recalques.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se uma visão geral sobre RSU, aterros sanitários, estudos de recalques, propriedades físicas, químicas e biológicas, envolvendo temperatura, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), teor de umidade, sólido voláteis, ácidos voláteis, dentre outros parâmetros. Por fim faz uma abordagem sobre estatística multivariada, especificamente em relação à ACP.

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

A definição de resíduos sólidos é algo complexo, uma vez que existem diversos conceitos e classificações. Na realidade, este termo é bastante amplo, englobando, além dos materiais no estado sólido, materiais semi-sólidos e líquidos (ABNT NBR 10.004 , 2004; COMPARIM, 2011; NASCIMENTO, 2007). Existem várias definições para RSU e é conveniente abordá-las para um embasamento maior no trabalho (MELO, 2011).

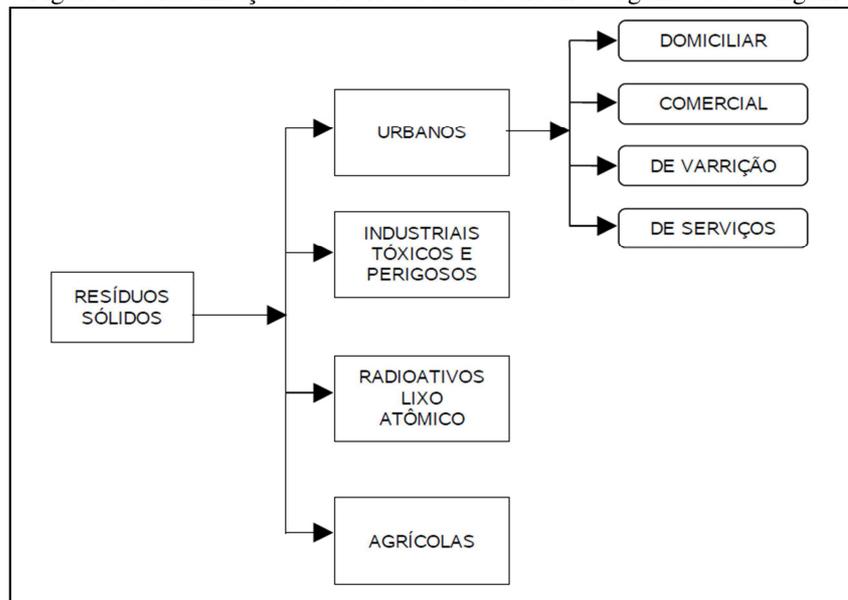
O conceito de RSU, instituída pela Lei Federal nº 12.305/10, é todo o resíduo originado de atividades domésticas em residências urbanas, além da limpeza urbana oriundas da varrição, de logradouros e vias públicas, bem como de outros serviços de limpeza urbana. Segundo a Abrelpe (2013), no Brasil, a geração de resíduos sólidos domiciliares e de varrição, logradouros e entulhos é cerca de 1,041 kg/hab./dia. Este valor representou um aumento de 0,39% no ano de 2013 em relação ao de 2012.

O aumento de geração de resíduos exige obras de aterros com dimensões cada vez maiores. Sistemas de reaproveitamento de resíduos, bem como métodos de coleta seletiva, devem ser aprimorados no sentido de reciclar os materiais para voltarem à cadeia produtiva. Os RSU constituem-se numa mistura heterogênea de materiais sólidos que podem ser parcialmente reciclados e reutilizados (SCHULER, 2010; CARDIM, 2008, CARVALHO, 1999). Se o material descartado, após um primeiro uso, for reutilizado ou reciclado, terá como

benefício imediato o aumento da vida útil de aterros, além de proteger ou evitar danos à saúde pública e o meio ambiente.

Os resíduos sólidos, segundo (ABNT NBR 10004, 2004), podem ser classificados de acordo com sua origem como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Classificação dos resíduos sólidos urbanos segundo a sua origem



Fonte: Nascimento (2007)

Os resíduos urbanos são gerados nas áreas urbanas, enquanto que os resíduos industriais, radioativos e agrícolas são originados a partir de processos de transformação, conhecidos como resíduos especiais. Estes, por possuírem características peculiares, necessitam de cuidados mais específicos quanto à coleta, acondicionamento, transporte, manipulação e disposição final.

O conhecimento das classificações, bem como sua origem, possibilita uma escolha mais apropriada na seleção de processos de tratamento e técnicas de disposição final a ser utilizada. Desta maneira a classificação é relevante para a escolha da estratégia de gerenciamento mais viável, podendo reduzir riscos à saúde humana e ao meio ambiente.

Os RSU também podem ser classificados quanto a sua periculosidade, composição química e características físicas, conforme a ABNT NBR 10.004 (2004). Estas classificações são mostradas no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificações dos RSU quanto a periculosidade, composição química e características físicas

Classificação	Tipos	Descrição
Periculosidade	Classe I	Apresentam características tóxicas, corrosivas, reativas, patogênicas, oferecendo riscos à saúde pública e ao meio ambiente.
	Classe II ou Não-Inertes	Apesar de não serem inertes, estes resíduos não apresentam periculosidade e têm características de lixo doméstico.
	Classe III B ou Inertes	São constituídos por aqueles que não têm nenhum de seus componentes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de portabilidade de água, quando submetidos a teste-padrão de solubilização.
Quanto à composição química	Secos	Papéis, plásticos, metais, couros tratados, tecidos, madeiras, guardanapos e tolhas de papel, pontas de cigarro, isopor, lâmpadas, parafina, cerâmicas, porcelana, espumas, cortiças, plásticos, vidros, borrachas, tecidos, metais (alumínio, ferro, etc.), tecidos, entre outros.
	Molhados	Restos de comida, cascas, pó de café e chá, cabelos, restos de alimentos, cascas e bagaços de frutas e verduras, ovos, legumes, alimentos estragados, ossos, aparas e podas de jardim, entre outros.
Quanto às características físicas	Orgânicos	Originados principalmente da decomposição de plantas e animais, matéria orgânica, resíduos e esgotos domésticos, resíduos de podas e jardinagem, lodos de ETE, excrementos humanos e animais.
	Inorgânicos	Substâncias químicas minerais ou bioquímicas, relativamente estáveis ou capazes de alterar as condições físico-químicas e biológicas do meio, são praticamente os resíduos industriais de metalúrgicas, refinarias de petróleo, mineração (FERREIRA, 2006).

Fonte: ABNT NBR 10.004 (2004)

A partir destas informações, escolhas podem ser feitas quanto a disposição final destes resíduos. A destinação correta é fundamental, tendo em vista que vários impactos ambientais são decorrentes às diferentes formas de disposição e as características dos resíduos. Sua disposição no solo, em lixões ou aterros, por exemplo, constitui uma importante fonte de exposição humana a várias substâncias tóxicas. As principais rotas de exposição a

esses contaminantes são através do solo, do ar e dos líquidos lixiviado (EL-FADEL et al., 1997; WARD; WILLIAMS, 1996).

Deve-se destacar que a geração de RSU é um fenômeno inevitável que ocorre diariamente, entretanto os resíduos devem ser tratados e acondicionados em locais adequados, conforme a classificação destes resíduos.

O Quadro 2 mostra a diversidade de resíduos, as fontes geradoras, agentes responsáveis pela gestão e modalidades de tratamento e disposição final existente.

Quadro 2 - Características dos resíduos sólidos e da sua gestão

Resíduos sólidos	Fontes geradoras	Resíduos produzidos	Responsável	Tratamento e disposição final
Domiciliar (RSD)	Residências, edifícios, empresas, escolas	Sobras de alimentos, produtos deteriorados, lixo de banheiro embalagens de papel, vidro, metal, plástico, isopor, pilhas, eletrônicos baterias, fraldas e outros	Município	1. Aterro sanitário 2. Central de triagem de recicláveis 3. Central de compostagem 4. Lixão
Comercial pequeno gerador	Comércios, bares, restaurantes, empresas	Embalagens de papel e plástico, sobras de alimentos e outros	Município define a quantidade	1. Aterro sanitário 2. Central de triagem da coleta seletiva 3. Lixão
Grande gerador (maior volume)	Comércios, bares, restaurantes, empresas	Embalagens de papel e plásticos, sobras de alimentos e outros	Gerador	1. Aterro sanitário 2. Central de triagem de recicláveis 3. Lixão
Público	Varrição e poda	Poeira, folhas, papéis e outros	Município	1. Aterro sanitário 3. Central de compostagem 4. Lixão
Serviços de saúde (RSS)	Hospitais, clínicas, consultórios, laboratórios	Grupo A – biológicos: sangue, tecidos, vísceras, resíduos de análises clínicas e outros Grupo B –	Município gerador	1. Incineração 2. Lixão 3. Aterro Sanitário 4. Vala séptica

		químicos: lâmpadas, medicamentos vencidos e interditados, termômetros, objetos cortantes e outros Grupo C – radioativos Grupo D – comuns; não contaminados; papéis, plásticos, vidros, embalagens e outros		5. Micro-ondas 6. Autoclave 7. Central de triagem e recicláveis
Industrial	Industrial	Cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, escórias e outros	Gerador	1. Aterro industrial 2. Lixão
Portos, aeroportos, terminais	Portos, aeroportos, terminais	Resíduos sépticos, sobras de alimentos, material de higiene e asseio pessoal e outros	Gerador	1. Incineração 2. Aterro sanitário 3. Lixão
Agrícola	Agricultura	Embalagens de agrotóxicos, pneus e óleos usados, embalagens de medicamentos veterinários, plásticos e outros	Gerador	Central de embalagens vazias de Inpev
Construção (RCC)	Obras e reformas residenciais e comerciais	Madeira, cimento, blocos, pregos, gesso, tinta, latas, cerâmicas, pedra, areia e outros	Gerador Município e gerador pequeno e grande	1. Ecoponto 2. Área de transbordo e triagem (ATT) 3. Área de reciclagem 4. Aterro de RCC 5. Lixões

Fonte: Sinduscom (2005), EPA (2015), Cetesb (2015) e Inpev (2011)

A importância de se conhecer desde a fonte geradora até o descarte final de resíduos pode nortear melhores métodos de gestão e gerenciamento, antes mesmo de estes serem gerados (Quadro 2). Pereira et al., (2010), sugere que, ainda, a composição gravimétrica e

volumétrica dos RSU pode se tornar um aliado na tomada de decisões, principalmente do poder público, uma vez que, conhecendo intimamente os resíduos poder-se-á ter políticas que beneficiem tanto o gerador como o que vai acondicioná-lo.

2.1.1 Composições gravimétrica e volumétrica

A composição gravimétrica e volumétrica pode ser um indicador para programas de reciclagem e reutilização (PEREIRA et al., 2010). Valores encontrados na Tabela 1 mostram que em algumas regiões a composição dos resíduos é diferente e outras semelhantes.

A tabela 1 apresenta dados de composição gravimétrica de RSU em diversas cidades do Brasil.

Tabela 1 - Composição gravimétrica de RSU em cidades do Brasil

Componentes	Materiais putrescíveis (%)	Papel/papelão (%)	Plástico (%)	Metais (%)	Madeira/couro/vidro/borracha/outros (%)
Brasília	50,0	26,0	15,0	2,5	6,5
Belo Horizonte	61,6	9,50	10,9	2,3	15,7
Campina Grande ¹	66,0	5,0	11,0	3,0	-
Curitiba	66,0	3,0	6,0	2,0	23,0
Maceió	50,0	16,0	13,0	3,0	18,0
Palmas	63,0	10,7	11,4	5,9	9,0
Porto Alegre	74,0	11,0	6,0	4,0	5,0
Salvador	70,0	16,0	10,0	1,5	2,5
São Paulo	58,0	13,0	16,0	2,0	11,0
Rio de Janeiro	60,7	13,5	15,3	1,6	8,9
Recife	46,3	12,2	19,4	1,9	20,2

Fonte: Tapahuasco (2009)

A cidade de Campina Grande apresenta dados semelhantes aos de Curitiba, no entanto valores apresentados na Tabela 1 são próximos à média da composição gravimétrica no Brasil (IPEA, 2012). O número de habitantes da cidade, o nível educacional da população, o poder aquisitivo e o nível de renda familiar, os hábitos e os costumes da população, as condições

¹ Neto et al. (2014)

meteorológicas e sazonais e a industrialização de alimentos são fatores que refletem na composição dos RSU.

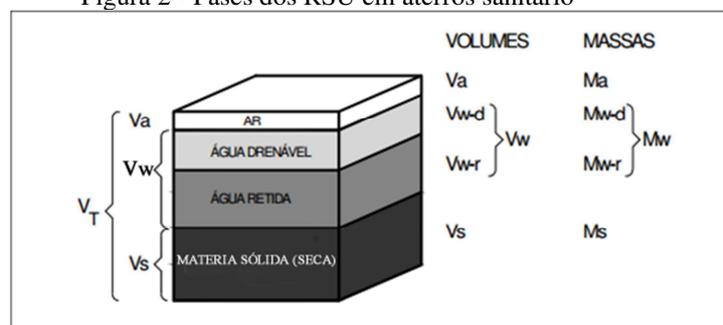
Os estudos de caracterização física dos resíduos contribuem, ainda, para o monitoramento ambiental, na compreensão do processo de decomposição da massa de lixo e na estimativa da vida útil da área (MELO; JUCÁ, 2000).

2.1.2 Fases presentes nos RSU

Em aterros sanitários quando atinge o limite da capacidade de absorção de líquidos, estes se encontram saturados e, a partir daí, se observa o início da formação de líquidos lixiviado (SIMÕES, 2000). Os gases presentes durante a disposição inicial dos resíduos e os gases gerados durante o processo de decomposição de matéria orgânica também podem saturar, formando uma fase gasosa dentro da massa de resíduos.

Segundo Schuler (2010), a composição dos RSU é bastante heterogênea na qual é constituída por quatro fases. O ar, a água drenável, a água retida e a matéria sólida são fases dos RSU e podem ser identificados quanto à massa e o volume que ocupam num determinado espaço em aterros sanitários. De acordo com a Figura 2, o volume total (V_T) é composto por ar (V_a), água (V_w) e matéria sólida (V_s), cabendo destacar que o V_w é dividido em volume de água drenável (V_{w-d}) e água retida (V_{w-r}). Desta maneira, as fases também podem ser expressas em termos de massa e são compostas por ar (M_a), água drenável (M_{w-d}), água retida (M_{w-r}) e matéria sólida (M_s).

Figura 2 - Fases dos RSU em aterros sanitário



Fonte: Adaptado por Schuler (2010)

Ainda segundo o autor, água drenável, circula livremente através dos vazios dos sólidos e podem ser adsorvidas por alguns materiais, como por exemplo, papel e papelão. Este

processo faz com que os líquidos fiquem retidos na massa dos RSU alterando a propriedade física do material e não fluindo através dos drenos (líquidos não drenáveis).

O elevado teor de umidade no interior dos RSU resulta em fluxo de líquidos na massa de resíduos, nos quais modificam as propriedades das partículas sólidas, gerando líquidos com alto potencial de contaminação ao meio ambiente, conhecidos como chorume ou líquidos lixiviados. Desta forma, a elevada porosidade, permite que o fluxo de líquidos perole com facilidade e arraste as partículas sólidas ao longo da espessura.

Na fase sólida podem ser identificadas três categorias de materiais: (a) elementos inertes estáveis (metais, vidro, entulho); (b) elementos muito deformáveis (papéis, plásticos e têxteis); (c) elementos biodegradáveis (matéria orgânica e materiais poliméricos biodegradáveis).

Os RSU, assim como os solos, são meios multifásicos constituídos de elementos sólidos, líquidos e gasosos, mas de comportamento mecânico e características físico-químicas distintas (GRISOLIA; NAPOLEONI, 1996; SIMÕES, 2000). Deste modo, são muitos e complexos os mecanismos que governam a evolução dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos.

2.2 Aspectos gerais de aterros sanitários

O aterro sanitário é uma das formas mais comum e adequada de disposição final de RSU. De forma sintetizada, o aterro consiste em uma técnica de disposição de RSU no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública, assim minimizando os impactos ambientais (JACOBI; BESEN, 2011). Contudo, os aterros não podem ser vistos como simples local de armazenamento, pois se torna indispensável à otimização de projetos e a aplicação de metodologias operacionais capazes de assegurar, de modo estável, a evolução dos processos de degradação e estabilidade geotécnica do aterro (MONTEIRO, 2003).

A escolha do local, os componentes do sistema, os materiais empregados, a operação, o monitoramento, o planejamento para o fechamento e pós-fechamento são medidas preventivas para minimizar os impactos ambientais nos aterros sanitários no Brasil e é prevista pela Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. Schuler (2010) relata que atualmente sabe-se que diversos fatores influenciam nas características dos RSU, e devem ser estudados caso a caso, como um problema de geotecnia em geral.

Uma seção típica de um aterro sanitário Figura (3), mostra de uma maneira geral a operação de um aterro. As etapas de divisão de células, compactação dos resíduos, cobertura, sistema de impermeabilização, sistema de drenagem para líquidos e gases, tratamento de chorume, monitoramento geotécnico e ambiental são importantes em projetos de aterros de resíduos sólidos (BOSCOV, 2008).



A construção de aterros sanitários, de acordo com Bidone e Povinelli (1999), devem apresentar critérios de engenharia tais como : projetos de sistema de drenagem periférica e superficial para afastamento de água de chuva, de drenagem de fundo para a coleta de percolado, de sistema de tratamento para o percolado drenado, de drenagem e queima dos gases energéticos gerados durante o processo de bioestabilização da matéria orgânica .

Compreender o lixo depositado em aterros e estabelecer relações físico-químicas, mecânicas e microbiológicas durante o processo de degradação dos resíduos ao longo do tempo, permite aperfeiçoar processos depreciativos e operacionais em projetos futuros, além de estabelecer correlações entre o ambiente interno, externo e a massa de resíduos. Apesar de um aterro sanitário ser uma obra de engenharia, também deve ser considerado como um grande reator bioquímico (MONTEIRO, 2003; CANDIANI, 2011), a fim de entender tais processos e projetar aterros eficientes.

Nos Estados Unidos, uma parte do aterro tem que ser operado como um biorreator para obter requisitos de controle em tempo hábil (USEPA, 2014). Já no Brasil, a licença ambiental dos aterros de pequeno porte devem apresentar estudos ambientais, incluindo projeto do aterro proposto, acompanhados de anotação de responsabilidade técnica, além de plano de operação, acompanhamento e controle nos aterros (CONAMA, 2008). No entanto, a PNRS, instituída pela Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010, definem as regras gerais para aterros sanitários de qualquer porte e afirma que pesquisa científica e tecnológica deve ser inserida em projetos de aterros sanitários.

2.2.1 Células experimentais de RSU

Estudos geotécnicos, mecânicos, microbiológicos e físico-químicos são bem compreendido se estudados em células experimentais instrumentadas adequadamente para de maneira a obter dados específicos sobre os RSU e características da região (MELO, 2011; MONTEIRO, 2003, MCDOUGALL et al., 2004).

No intuito de conhecer melhor o funcionamento de aterros de RSU e entender como eles sofrem perda de massa e recalque devido à decomposição dos resíduos, esforços mecânicos e processos químicos, as células experimentais representam uma técnica bastante interessante. Estas células experimentais auxiliam na obtenção de parâmetros para projetos, dimensionamento, construção e monitoramento de aterros.

Segundo Alcântara (2007) um aterro de RSU é um sistema que possui características próprias, mas mutável de acordo com o local de instalação. Por exemplo, ambientes com mais precipitações podem afetar a umidade interna dos resíduos e por consequência influenciar no ambiente microbiano, biodegradação, toxicidade e parâmetros físicos e químicos.

Simões e Catapreta (2012) realizaram estudos sobre estimativa de recalques aplicando modelos matemáticos existente na literatura através de obtenção de parâmetros a partir de uma célula experimental com 3,8 m de altura, sendo 3,2m de espessura de resíduos e 0,6m de camada de cobertura; ocupando uma área de 5.260m² e peso específico dos RSU de 5,1 kN/m², localizado no aterro sanitário em Belo Horizonte/MG. O monitoramento da célula experimental estudada pelo autor durante seis anos mostrou que a previsão dos recalques é complexa devido à heterogeneidade dos RSU e aos complicados processos mecânicos e

microbiológicos que ocorrem na massa de resíduos, no entanto vários modelos foram testados no intuito de propor um modelo matemático fiel à previsão de vida útil em aterros sanitários.

As células experimentais nos aterros sanitários, em muitos casos, dão informações importantes a cerca de características mecânicas, microbiológicas e físico-químicas dos resíduos ali depositados, além de permitir em muitos casos, antecipar uma decisão, como por exemplo, prolongar a vida útil de um aterro e/ou aumentando a capacidade para suporta mais resíduos.

Marques et al. (2003), fez estudos no maior aterro sanitário da cidade de São Paulo/SP, Bandeirantes, utilizando uma célula experimental piloto. Esta célula apresentou uma área de 8.400m^2 e 4 m de altura, com peso específico dos RSU de $7,0\text{ kN/m}^2$, além de estudos em pontos específicos no próprio aterro. Vale ressaltar que o aterro estudado apresenta cerca de 100m de coluna de resíduos com percentual de 56,3% de matéria orgânica. Segundo o autor, o encerramento deste aterro estava previsto para 2005, no entanto seu encerramento aconteceu em 2007. Com este estudo foi possível os autores propor um modelo de compressibilidade para o aterro sanitário de Bandeirantes, no qual esta aplicação requer cinco valores de parâmetros tais como: deformação devido à degradação dos RSU, constante de decomposição microbiológica, coeficiente de compressibilidade primária, coeficiente de compressibilidade secundária, constante de compressibilidade secundária, bem como o conhecimento da história de colocação dos resíduos. De acordo com Wall e Zeiss (1995) os recalques em aterros sanitários de RSU podem variar de 25% a 50% em relação à altura inicial dos resíduos, e destes recalques pouco se sabe quanto de fato o teor de material orgânico degradável contribui para sua ocorrência.

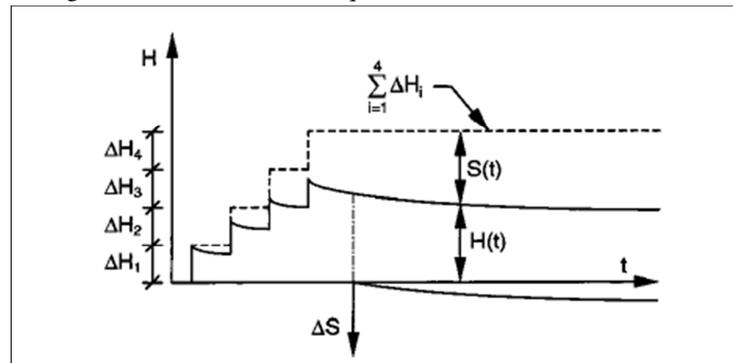
Aperfeiçoar o tratamento de RSU através do desenvolvimento de alternativas tecnológicas permite uma maior eficiência nos processos biodegradativos e na aplicação de técnicas de operação mais adequadas compatíveis com os aspectos meteorológicos, econômicos e gerenciais de cada região.

2.2.2 Estudos dos Recalques

Em geral, os recalques nos aterros sanitários acontecem conforme o modelo proposto por Marques et al. (2003) e Babu e Lakshmikanthan (2015) (Figura 4). O esquema mostra

várias células de um aterro sanitário e a ocorrência dos recalques em função do tempo. Além da composição heterogênea dos constituintes, a degradação dos resíduos orgânicos com o passar do tempo e a compressibilidade em decorrência da sobrecarga são consideradas pontos relevantes no comportamento peculiar dos resíduos sólidos e na evolução dos recalques.

Figura 4 - Modelo dos recalques em aterros sanitários de RSU



Fonte: Marques et al. (2003) e Babu e Lakshmikanthan (2011)

O somatório destes recalques ($\sum_{i=1}^4 \Delta H_i$) decresce com a idade do aterro e dependem de uma gama de variáveis no qual origina modelos matemáticos de previsão de recalques e inúmeras teorias.

De acordo com Ouvry et. al. (2005) os principais mecanismos envolvidos nos processo de recalques são:

- Compressão física devido à distorção mecânica, dobras, trituração e reorientação;
- Ravinamento interno devido à migração de pequenas partículas nos vazios entre as partículas de grandes dimensões;
- Comportamento viscoso e consolidação envolvendo tanto o esqueleto sólido e as partículas individuais;
- Modificações químicas, físicas, tais como a corrosão e oxidação;
- Biodegradação de compostos orgânicos.

Conforme Boscov (2008), os recalques são muito elevados quando comparados com os mecanismos nos maciços de solos. Problemas em decorrência aos recalques são vistos principalmente através do surgimento de trincas na cobertura final.

Cardim (2008), afirma que as sobrecargas excessivas da massa de RSU causam instabilidade, podendo oferecer riscos aos operários, catadores e até a saúde da população local. Desta forma, os recalques em aterros sanitários abordados com foco em modelos matemáticos, são normalmente divididos em três principais momentos, tais como: recalque imediato, primário e secundário (BJARNGARD; EDGERS, 1990).

Os recalques imediatos ocorrem pelo peso próprio dos RSU e sobrejacente a aplicação de cargas adicionais sobre os resíduos durante a deposição em aterros. Nesta etapa, o recalque acontece de maneira rápida (BJARNGARD; EDGERS, 1990; WALL; ZEISS, 1995; BAREITHER et al., 2012).

O recalque primário ocorre devido à expulsão de líquidos e gases do interior da massa de resíduos. Desta forma, este processo ocorre quando os espaços preenchidos por estes fluidos (gases e líquidos) são comprimidos devido à redução de vazios pela ação de cargas impostas. Mas esta condição em RSU é raramente verdadeira devido a sua elevada condutividade hidráulica e estado não saturado depois da deposição dos resíduos (BJARNGARD; EDGERS, 1990; EDIL et al., 1990). Além disso, a compressão primária é mais bem considerada como um tipo de creep plástico (LANDVA et al., 2000) como resultado de um amolecimento físico ou deslizamento de certos componentes tais como: papel ou papelão e, possivelmente, quando estes materiais entram em contato com o líquido (POWRIE, RICHARDS; BEAVEN, 1998).

Já o recalque secundário, ocorre principalmente devido à conversão de matéria orgânica biodegradável em subprodutos (biogás, água e sólidos particulados), no qual estes subprodutos são expulsos através dos drenos de gases e líquidos nos aterros sanitários, fazendo com que o volume de compostos orgânicos biodegradáveis presentes na massa de RSU seja reduzido, assim resultando em recalques. Este tipo de recalque se prolonga com o tempo e está relacionado com o decaimento microbiológico e o progressivo acomodamento da estrutura dos RSU (MOREDA, 2000).

A deformação específica são os recalques em termos percentuais e formulados como a razão da deformação vertical pela altura inicial em termos percentuais. Esta propriedade se torna muito importante, pois está relacionada a deformabilidade dos resíduos ali depositados. Alguns valores encontrados na literatura estão na Tabela 2.

Tabela 2- Deformações específicas em aterros

Autor	Deformações específicas
Sowers (1973)	Da ordem de 30%
Wall e Zeiss (1995)	Entre 25% e 50%
Van Meertenetal (1995)	Entre 10% e 25%
Coumoulos e Koryalos (1997)	Entre 20% e 25%
Abreu (2000)	Entre 10% e 30%

Fonte: Boscov (2008)

Estas deformações específicas demonstram o quanto os aterros são deformáveis e que as características geográficas e econômicas, bem como a composição dos RSU, a estrutura dos aterros sanitários, a localização geográfica, dentre outros fatores influenciam na faixa de valores, conforme apresentados na Tabela 3. Cabe destacar que os RSU estudados pelos autores são de localizações distintas e com faixa de valores diferenciado.

Ainda, há a necessidade que a concepção de recalques e sua estimativa sejam mais amplamente discutidas no Brasil por pesquisadores da área, no intuito de aprimorar as técnicas existentes de construção de aterros, bem como de inovar os métodos de previsão e monitoramento desses parâmetros a partir de modelos computacionais mais fiéis a sua previsão.

Desta maneira, a necessidade de conhecimento da ocorrência de recalques em aterros sanitários tem motivado diversos pesquisadores na busca pela elaboração de modelos teóricos e empíricos que estimem com razoável precisão dessa propriedade geotécnica (SIMÕES et al., 2005). Contudo existe grande dificuldade em sintetizar esses modelos devido à complexidade da avaliação de recalques fruto da enorme gama de variáveis envolvidas no sistema.

De um modo geral, para avaliar os recalques pode-se destacar o monitoramento físico-químico, microbiológico, térmico, estrutural dos subprodutos (sólidos, líquidos e gasosos) e condições ambientais. Estas deformações podem ser quantificadas a fim de prevenir eventuais mudanças de declividade pelos recalques diferenciais.

2.2.3 Processos degradativos

O aterro de RSU é um sistema dinâmico, pois os resíduos são diferentes uns dos outros devido a sua composição, diferindo também durante o processo de degradação são estabelecidas relações físicas, químicas, físico-químicas, biológicas e mecânicas que acontecem ao longo do tempo (MELO, 2011).

O processo de degradação da matéria orgânica nos aterros envolve um complexo sistema de interações físico-químicas e microbiológicas, em um conjunto de múltiplas variáveis. Maciel (2009) apresenta fatores fundamentais para o processo, conforme demonstrado no Quadro 3.

Quadro 3-Fatores que afetam o processo de degradação dos RSU

Geometria e operação do aterro	Características iniciais dos resíduos	Ambiente Interno	Ambiente externo
Dimensão do aterro	Composição dos resíduos	Umidade da massa	Precipitação e infiltração
Impermeabilização do aterro	Umidade dos resíduos	pH	Variação de pressão atmosférica
Compactação dos resíduos		Temperatura	Temperatura ambiente
Tipo de cobertura		Presença de nutrientes/bactérias	

Fonte: Maciel (2009)

De acordo com Hirsch et al. (2002) a biodegradação em aterros sanitários pode-se dividir em duas fases: a primeira, denominada aeróbia, que começa inclusive antes de depositados os resíduos no aterro sanitário; a segunda fase, denominada anaeróbia, começa quando o oxigênio presente na massa de resíduos é consumido por microrganismos ou foi expulso dos vazios por processo de compressão.

A digestão aeróbia apresenta curta duração e é responsável por uma parcela reduzida da decomposição. A biodegradação aeróbia produz dióxido de carbono, água, materiais parcialmente degradáveis e biomassa, além de promover uma elevação da temperatura do meio. Apesar de ser uma fase relativamente curta, o oxigênio poderá estar presente durante todo o processo de degradação da matéria orgânica.

No que se refere à digestão anaeróbia, esta pode ser considerada como um sistema onde diversos grupos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa

em metano, dióxido de carbono, gás sulfídrico e amônia (SIMÕES, 2000). O processo da digestão anaeróbia ocorre em diferentes fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (VAN HAANDEL; LETINGA, 1994).

A primeira fase é a hidrólise, momento em que o material orgânico particulado é convertido em compostos de menor peso molecular. As bactérias nesta fase lançam seus arsenais enzimáticos degradando estes compostos complexos em outros mais simples, podendo atravessar a membrana celular das bactérias fermentativas.

Em seguida, inicia-se a fase acidogênica, em que os compostos dissolvidos na fase de hidrólise são absorvidos e metabolizados pelas bactérias fermentativas, sendo convertidos em compostos mais simples, como por exemplo, os ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio.

Na terceira fase, denominada acetogênica, ocorre a conversão dos produtos da acidogênese em compostos, que formam o substrato apropriado para as arqueas metanogênicas produzirem metano tais como: acetato, hidrogênio e dióxido de carbono.

A quarta fase é a metanogênese. Nesta fase o metano é produzido por bactérias acetotróficas, a partir da redução do ácido acético, ou pelas bactérias hidrogenotróficas, a partir da redução do dióxido de carbono.

Os microrganismos podem aparecer em todos os tipos de *habitats* e, devido a sua versatilidade metabólica, conseguem sobreviver em ambientes que não sustentam outras formas de vida. Sua ação degradativa promove, principalmente, à produção de enzimas, responsáveis pela quebra das cadeias moleculares para obterem nutrientes. Diferente da maioria dos fungos, os processos biodegradativos realizados pelas bactérias podem ocorrer basicamente, em dois ambientes distintos: o aeróbio, no qual há presença de oxigênio que pode funcionar como oxidante de material orgânico; e o anaeróbio, em que não existe a presença deste oxidante (ROSA; FILHO, 2003; MADIGAN, et al., 2012).

Em processos biodegradativos, através da ação bioquímica de microrganismos, a temperatura é um fator que resulta em balanços energéticos, indicando que uma baixa temperatura significa menor atividade e menor taxa de conversão do material orgânico presente nos RSU.

Os sólidos voláteis em aterros sanitários indicam a quantidade de matéria orgânica presente no interior da massa de resíduos e podem sugerir como está o andamento do processo degradativo. Além disso, a biodegradação dos resíduos sólidos urbanos pode ser afetada pelo

teor de oxigênio, pH/alcalinidade, presença de sulfatos, nutrientes, toxinas, temperatura e teor de umidade (WARITH; SHARMA, 1998). Tais fatores são ditos intervenientes por influenciarem diretamente as características do lixiviado.

2.2.4 Propriedades físico-químicas

O conhecimento de informação sobre a composição dos RSU, bem como das interações microbiológicas, físico-químicas e mecânicas entre si é fundamental, pois a partir destas informações podem ser definidas as características técnicas para elaboração e dimensionamento de projetos em aterros sanitários.

Os parâmetros físico-químicos são importantes na avaliação da degradação dos resíduos sólidos em aterros. Segundo, Olivier e Gourc (2007) as ações mecânicas, reorientações de partículas, transformações por reações físico-químicas e decomposição bioquímica com perda de massa na forma de gás ou líquida drenados, condicionam os mecanismos de recalques na massa de resíduos. Cabe destacar, que os processos físico-químicos e microbiológicos estão associados às deformações que ocorrem na massa de resíduos no interior de um aterro (ALCÂNTARA, 2007).

As principais variáveis físico-químicas necessárias ao entendimento da biodegradação da matéria orgânica presente nos RSU são: o potencial hidrogeniônico pH, a alcalinidade, ácidos graxos voláteis, sólidos voláteis e sais de cloretos.

O pH é um parâmetro que expressa a intensidade da condição ácida ou básica de um determinado meio. É definido como cologaritmo decimal da concentração efetiva ou atividade dos íons hidrogênio.

A alcalinidade de um líquido é a sua capacidade de neutralização de ácidos e equivale à soma de todas as bases tituladas. Esta, ainda, representa a medida de uma propriedade do líquido associada à sua capacidade de tamponamento e só pode ser interpretada em função de substâncias específicas, quando a composição química da amostra analisada é conhecida. O valor determinado pode variar significativamente, dependendo do valor do pH final usado como referência (LEITE, 2008).

Os ácidos graxos voláteis advêm da solubilização do material particulado e passam a ser substratos ou material tóxico para determinadas espécies bacterianas responsáveis pela

bioestabilização do material orgânico. Segundo Kroecker (1979) os ácidos voláteis são tóxicos para as bactérias metanogênicas na concentração em torno de 2000mgHAC/L. Já os sólidos voláteis são indicativo direto da quantidade da matéria orgânica presente na massa de resíduos e pode auxiliar na estimativa de produção de biogás.

Os ácidos voláteis são um dos compostos mais importantes na avaliação da digestão anaeróbia devido à influência de bactérias que hidrolisam o material complexo e o convertem em ácidos de menor peso molecular, tais como: o ácido acético (CH_3COOH), o propiônico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$) e o butírico ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$) que estão misturados a outros elementos importantes (LEITE, 2008).

Já os Sólidos Voláteis, consiste em importante indicador da degradabilidade dos RSU ao longo de toda a decomposição dos resíduos, é por meio deste que é determinada a quantidade de matéria orgânica através da porcentagem do teor de cinzas. Segundo Lima (2004) a fração de matéria que se volatiliza no processo é definida como Sólidos Voláteis. Este parâmetro consiste em importante indicador da degradabilidade dos RSU ao longo de toda a decomposição dos resíduos, é por meio deste que é determinada a quantidade de matéria orgânica através da porcentagem do teor de cinzas.

O nível de cloretos pode indicar o comportamento de uma pluma de contaminação, pois os cloretos são os primeiros compostos a serem identificados permitindo que ações sejam tomadas no sentido de conter a contaminação a partir da fonte de origem (JUNQUEIRA, 2000). Dessa forma, a grande importância do monitoramento dos níveis de cloretos produzidos em um aterro está relacionada à grande utilização desse parâmetro como um “traçador natural”.

Os lixiviados gerados no processo de decomposição dos resíduos podem conter altas concentrações de metais pesados, sólidos suspensos e compostos orgânicos originados da degradação de substâncias que são metabolizadas, como carboidratos, proteínas e gorduras. Muitos metais quando em altas concentrações, podem danificar os sistemas biológicos por apresentarem características bioacumulativas no organismo (CELERE, 2007).

Os metais pesados constituem espécies químicas não degradáveis, por isso, ao serem colocados no meio ambiente, são distribuídos no solo, ar, água, e às vezes mudam seu estado de oxidação incorporando-se aos seres vivos (VULLO, 2003).

Segundo Sisino (1995), a concentração de metais pode variar de acordo com o estágio de decomposição dos resíduos, sendo maiores durante a fase de fermentação ácida, quando

estes elementos estão mais solúveis e menores nas últimas fases de estabilização, quando o pH normalmente é mais alcalino. De maneira geral, pode-se dizer que os metais são considerados uma das principais fontes de toxicidade aos resíduos sólidos e influenciar na eficiência degradativa.

2.2.5 Propriedades microbiológicas

Em RSU são encontrados diversos microrganismos, dentre eles destacam-se as bactérias e fungos que se alimentam do material biodegradável presente nos resíduos. As bactérias são classificadas de acordo com a capacidade de metabolização do oxigênio (O₂). Esta classificação depende da fase de decomposição dos resíduos e das condições de oxigenação do ambiente (MACIEL, 2003).

As bactérias degradadoras são microrganismos importantes no processo de decomposição de diferentes materiais, podendo ser encontrados nos resíduos urbanos. Estas podem aparecer em todos os tipos de *habitats* e, devido a sua versatilidade metabólica, conseguem sobreviver em ambientes que não sustentam outras formas de vida. Sua ação degradativa é devida principalmente à produção de enzimas, responsáveis pela quebra das cadeias para obterem nutrientes. Diferente dos fungos, os processos biodegradativos realizados pelas bactérias podem ocorrer basicamente, em dois ambientes distintos: o aeróbio, no qual há presença de oxigênio que pode funcionar como oxidante de material orgânico, e o anaeróbio, no qual este oxidante não existe (ROSA; FILHO, 2003; CAMPOS, 1999; MADIGAN, et al., 2002).

Já os fungos são microrganismos esporógenos, cabendo destacar que a presença destes, ao longo do processo de degradação de RSU em aterros, indica que sua permanência por muito tempo no ambiente do aterro, mesmo após a estabilização do material orgânico (ALCÂNTARA, 2007). Em sua maioria, os fungos são microrganismos heterotróficos, aeróbios e apresentam uma digestão extracorpórea. Em geral toleram variações de temperatura e pH, podendo até mesmo sobreviver em ambientes que apresentem condições adversas. A presença destes microrganismos no processo de biodegradação é importante, visto que são os primeiros degradadores a se estabelecerem na massa de resíduos e por conseguirem transformar compostos complexos em subprodutos menos complexos e de fácil digestão.

A degradação aeróbia ocorre devido à presença do elétron aceptor O_2 , sendo que, os microrganismos são capazes de degradar a matéria orgânica a um composto inorgânico. Nas regiões superiores de um aterro, o O_2 deve ser suficiente para manter esta condição, onde o carbono orgânico será convertido a CO_2 ; o nitrogênio orgânico a NO_3 ; o hidrogênio a H_2O ; o fósforo a PO_4^{-2} e o enxofre a SO_4^{-2} (CARVALHO, 1997). Esta fase apresenta curta duração, pois a própria operação dos aterros sanitários, dos quais usualmente são usadas camadas de cobertura diária, se torna um fator limitante de disponibilidade de oxigênio. Tal fase é responsável por uma parcela reduzida da decomposição.

As bactérias anaeróbias são um dos principais microrganismos que atuam na biodegradação dos resíduos sólidos. Assim, é fundamental o estudo sobre o comportamento desses organismos em biorreatores em escala piloto para compreender o papel desempenhado por estas no processo degradativo da fração orgânica dos resíduos e na produção de gases.

Microrganismos de modo geral têm grande tendência a se fixar em superfície sólida para se desenvolver. Assim, os microrganismos em resíduos sólidos podem aderir-se a materiais fibrosos, tais como, celulose ou sólidos inertes. Estes, ainda estão presentes nas fases líquidas – lixiviado (BARLAZ et al., 1989).

2.3 Estatística Multivariada

A estatística multivariada é um conjunto de métodos estatísticos responsáveis pela análise simultânea de medidas múltiplas para cada indivíduo ou objeto em análise, tendo como objetivo a redução dos dados, ordenando-os, agrupando-os e investigando a dependência das variáveis (NETO, 2013).

Segundo Neto (2004), métodos estatísticos para analisar variáveis estão dispostos em dois grupos: a primeira é a estatística univariada que visualiza as variáveis de maneira isolada e a estatística multivariada que olha as variáveis de forma conjunta.

Dessa forma, é interessante ter-se uma visão global de todas as variáveis, ou quase todas, utilizando técnicas multivariadas para subsidiar análises de determinados problemas. Assim dentre as técnicas multivariadas mais empregadas podemos citar: a análise de agrupamentos, análise de componentes principais, análise de discriminante e a análise de correspondência.

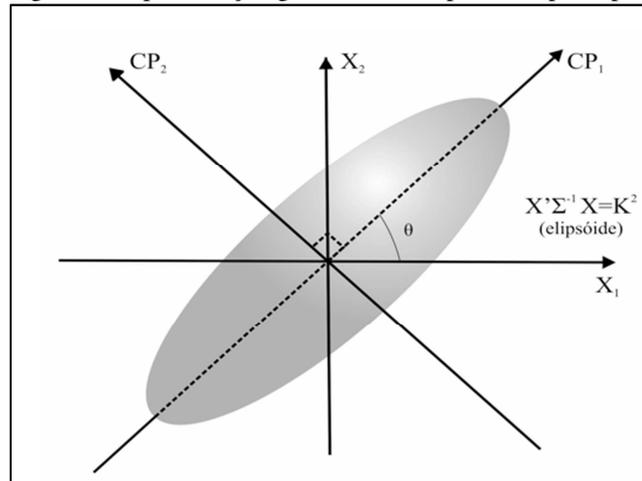
A estatística multivariada é largamente utilizada em pesquisas científicas para examinar as correlações entre as possíveis variáveis, reduzir a quantidade de conjuntos avaliados, examinar e promover o agrupamento de parâmetros, além de fazer uso de técnicas de agrupamento, entre outros. Deste modo, o uso da estatística multivariada é importante devido proporcionar métodos diferenciados, em fundamentação teórica e aplicabilidade (NETO, 2004).

2.3.1 Análise de Componentes Principais (ACP)

A ACP é uma ferramenta estatística poderosa, sendo um dos métodos estatísticos de “Análise Multivariada” mais simples e comumente requisitada por pesquisadores na busca de soluções de problemas relevantes para a sociedade. Conforme Andrade et al. (2007) a finalidade da ACP é obter componentes que ajudem a explicar as correlações entre as variáveis. Ou seja, quando se analisa uma matriz de correlação, os valores de correlações positivas, por exemplo, indica que os valores de uma variável aumentam à medida que também aumentam os valores de uma segunda variável, porém se os valores de uma variável aumentam à proporção que diminuem os valores da outra, a correlação é negativa (CATAPRETA, 2008).

A técnica do ACP reduz a dimensão de uma matriz de dados originais através de combinações lineares, facilitando a interpretação de dados (NETO, 2013). Ainda, esta ferramenta apresenta um ganho extremamente precioso com a redução da dimensionalidade sem que haja perda significativa de informação com essa redução. Consiste, também, em reescrever as coordenadas das amostras em outro sistema de eixos mais conveniente para a análise de dados. Tal conjunto de dados possui p CPs, sendo cada CP formado por uma combinação linear distinta das p variáveis aleatórias originais. Essas combinações são determinadas através de manipulações algébricas na matriz de covariâncias das p variáveis, conforme (Figura 5). Cada CP captura uma direção de variabilidade do conjunto de dados originais. As direções capturadas por cada CP são ortogonais entre si. Isso equivale a dizer que os CPs são variáveis aleatórias independentes (ROSA, 2001).

Figura 5- Representação gráfica das componentes principais



Fonte: Adaptado de Lopes (2001).

Segundo Martins et al. (2012), ACP é um método estatístico linear que calcula os autovalores e autovetores da matriz de covariância dos dados, no qual este resultado possibilita a redução dimensional dos dados e a análise dos padrões principais de variabilidade presentes. De acordo com Melo (2011), os autovalores são medidas do comprimento dos autovetores na elipse (Figura 5), já os autovalores de um conjunto de dados, consegue-se conhecer de que forma as variâncias da matriz de correlações como estão distribuídas. Isto é, visualizar as grandezas da figura elipsóide formada na distribuição espacial das variáveis. O autovalor é calculado pela soma dos quadrados de cada variável para a variável latente representada pelo fator obtido.

Ainda, esta técnica de ACP visa à construção da matriz de dados brutos que pode ser disposta em n medidas de diferentes propriedades (variáveis) executadas sobre m amostras (objetos), de modo que a matriz de dados é formada por $m \times n$ (m linhas correspondentes às amostras e n colunas correspondentes as variáveis) (VICINI, 2005). A j -ésima variável é representada por um vetor coluna. O i -ésimo objeto, ou seja, uma amostra qualquer, é representada por um vetor linha chamada vetor resposta, representada pela matriz indicada na Figura 6.

Figura 6 - Matriz de dimensão $n \times m$

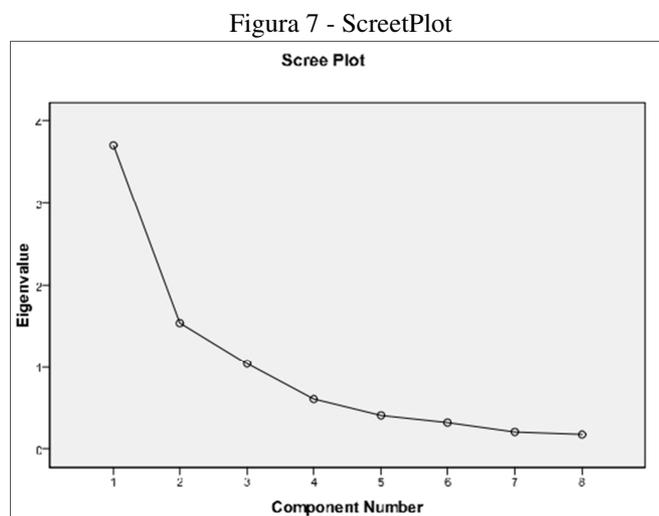
$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Fonte: REIS (2001).

Uma das mais importantes etapas é o pré-processamento, nessa fase o pesquisador deve decidir entre a matriz de covariância (dados centrados na média) ou escalonamento (dados centrados na média e divididos pelo desvio padrão). A segunda alternativa constitui a mais indicada, pois elimina o fato da diferença de amplitude de variação entre as variáveis, tornando as variações adimensionais e levado a resultados mais justos no caso de dados de engenharia.

Uma decisão a ser tomada diz respeito ao número de componentes principais que deve ser retido na análise. Se esse número é muito pequeno pode haver uma redução exagerada da dimensionalidade e muita informação pode ser perdida. Se o número for grande, pode-se não atender aos objetivos de redução. Na verdade, essa redução depende das correlações e das variâncias das variáveis originais (BARROSO; ARTES, 2003).

Existem vários critérios práticos para determinar quantas componentes reter na análise de ACP, dentre estes, tem-se o ScreePlot que é um método estatístico que permite analisar graficamente a porcentagem de variância explicada (autovalores) por cada componente, conforme demonstrado na Figura 7.



Fonte: REIS (2001).

No gráfico estão representados os autovalores, expresso no eixo da abscissa (*Component Number*), que contém, normalmente, a diferença de “*Eigenvalue*” entre os primeiros autovalores. Quando esta diferença se reduz e a curva passa a ser quase paralela ao eixo, exclui-se as componentes correspondentes Melo. (2011). Desta forma, a soma de todos

os autovalores é de 100%, no entanto, as componentes cuja soma representa mais que 70%, explicam uma boa variabilidade dos dados originais.

Ainda como critério, tem-se o método de Kaiser. Este sugere manter na análise as componentes principais correspondentes aos autovalores maiores do que a média dos autovalores. Se a análise for baseada na matriz de variâncias ou nas componentes principais com autovalores maiores que 1 e a matriz utilizada for a de correlação, poderá incluir, por meio deste critério, as componentes principais suficientes para explicar mais de 70% da variância (variabilidade) total dos casos (Martins et al., 2012). Algumas informações na escolha do critério a ser utilizado poderão ser úteis.

Assim qualquer que seja o critério a ser utilizado, deve-se sempre fazer o uso do bom senso e avaliar para que nenhuma componente principal com contribuição importante seja descartada.

CAPÍTULO 3

Neste capítulo são apresentados dois artigos científicos formatados e prontos para serem submetidos a periódicos. O Primeiro artigo ressalta estudos de recalques relacionados à matéria orgânica, utilizando uma célula experimental. Já o segundo artigo, também aborda estudos de recalques, porém com ênfase em parâmetros físico-químicos, microbiológicos e geotécnicos utilizando ferramentas estatísticas como suporte. Desta maneira assuntos de maior relevância destes trabalhos foram abordados em formas de artigos.

3.1 ARTIGO Nº1:

ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA NOS RECALQUES DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ATERRADOS²

RESUMO. Os recalques ou reduções de altura e volume da massa de Resíduo Sólidos Urbanos (RSU) em aterros sanitários são frutos da perda de parte sólida de seus constituintes orgânicos, mas também podem ser gerados a partir de rearranjos, distorções e outros fatores. Estas questões podem ser bem mais compreendidas se estudadas em células experimentais de RSU, que simulam o comportamento de um aterro, construídas sob condições conhecidas e/ou controladas. Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento da matéria orgânica presente no interior em uma célula experimental de RSU no que se refere a sua biodegradação e como este fator influencia os recalques ao longo do tempo e da profundidade. A metodologia contou com a construção e enchimento de uma célula experimental, além de análises físico-químicas, microbiológicas e de recalque realizadas durante o monitoramento. Foram feitos também, estudos de composição gravimétrica e volumétrica dos RSU, que puderam auxiliar na quantificação da matéria orgânica degradada ao longo da pesquisa. Através dos estudos verificou-se que a quantidade de matéria orgânica diminuiu acentuadamente em todos os níveis pesquisados e, que os recalques devido a estes compostos e a fatores mecânicos (carga imposta dos próprios resíduos) se mostraram variáveis de acordo com a profundidade.

Palavras-chaves: Matéria Orgânica, Recalques, Resíduos Sólidos Urbanos e Células Experimentais.

A CASE STUDY OF ORGANIC MATTER IN MUNICIPAL SOLID WASTE

ABSTRACT. Settlements are height and mass volume reduction of municipal solid waste (MSW) in landfills. They are usually the result of solid parts loss in their organic components. Settlements can also be generated by distortions, rearrangements, and other factors. These factors can be accurately analyzed if studied in an MSW experimental cell because it simulates landfill behavior in known and/or controlled conditions. This study aims to analyze the behavior of one MSW experimental cell during its biodegradation and how the biodegradation can influence settlements over time and depth. The construction and filling of an experimental cell and the analysis of physicochemical, microbiological and settlements during the cell monitoring were described in the methodology. The MSWs gravimetric and volumetric composition were performed in order to help with the quantification of degraded organic matter throughout the present research. The analysis indicated the amount of organic matter drastically decreased in all researched levels, and settlements varied according to the depth in the cell due to mechanic factors and cell's compounds.

Keywords: organic matter; settlements; municipal solid waste; experimental cell.

² Artigo submetido à Revista Soils and Rocks/Qualis B2 – Engenharias I.

40 **INTRODUÇÃO**

41

42 Os recalques ocorridos na massa de Resíduo Sólidos Urbanos (RSU) em aterros
43 sanitários são resultados da perda de parte sólida de seus constituintes orgânicos, mas também
44 podem ser gerados a partir de rearranjos, distorções e outros fatores. O maior contribuinte
45 para que os recalques ocorram é a matéria orgânica degradável presente no interior da massa
46 de resíduos e quanto maior a sua concentração, maior será o recalque. Assim, complexos
47 processos de degradação biológica, com inúmeras vias metabólicas dependentes de fatores
48 ambientais no interior da massa de resíduos, implicam em recalques e inferem diretamente na
49 sua velocidade e magnitude.

50 De acordo com Wall e Zeiss (1995) os recalques em aterros sanitários de RSU podem
51 variar de 25 % a 50 % em relação à altura inicial dos resíduos, e destes recalques pouco se
52 sabe quanto de fato o teor de material orgânico degradável contribui para sua ocorrência.
53 Entender qual é a velocidade da degradação da matéria orgânica e, conseqüentemente a
54 velocidade dos recalques é uma questão que precisa ser respondida para compreender o
55 comportamento mecânico de aterros de resíduos sólidos urbanos, bem como suas
56 deformações.

57 Estas questões podem ser mais bem compreendidas se estudadas em células
58 experimentais de RSU, que simulam o comportamento de um aterro construídas sob
59 condições conhecidas e/ou controladas. Em diversos locais do mundo e do Brasil há pesquisas
60 sendo desenvolvidas em células experimentais para se estudar o comportamento dos resíduos
61 depositados, levando em consideração as peculiaridades de cada região.

62 Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento da matéria orgânica
63 presente no interior de uma Célula Experimental de RSU no que se refere a sua biodegradação
64 e como estes influenciam os recalques ao longo do tempo e da profundidade.

65

66 **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

67

68 Os recalques ocorridos no interior de aterros sanitários podem ser causados pela
69 distorção física, flexão, esmagamento e reorientação das partículas de resíduo devido à carga
70 aplicada e sua fluência (BAREITHER et al., 2008). O seu monitoramento tem por objetivo

71 avaliar, indiretamente, a velocidade de decomposição da matéria orgânica, bem como medir o
72 abatimento ocorrido na massa sólida, de forma a se prever execuções de sobre-altura, ou
73 mesmo, se fazer estimativas de tempo de vida útil do aterro (Melo, 2003). Entretanto, a
74 efetiva participação da matéria orgânica em termos percentuais para se quantificar os
75 recalques ainda é desconhecida.

76 No interior de um aterro de RSU ocorrem processos aeróbios e anaeróbios de digestão
77 da matéria orgânica (ALCÂNTARA, 2007; ARAÚJO et al., 2009). O processo anaeróbio é o
78 mais significativo na biodegradação, já que o oxigênio é rapidamente depletado após o
79 aterramento dos RSU (Moreda, 2000).

80 Conforme Leite (1997), é bastante complexo o processo de bioestabilização anaeróbia
81 da fração orgânica putrescível nos RSU. Pela própria constituição físico-química dos RSU, e,
82 em especial pela presença significativa de material celulolítico, são necessários longos tempos
83 de operação para a bioestabilização completa da fração orgânica destes resíduos, e portanto, a
84 formação de produtos finais tais como: CH₄, CO₂, NH₃, quantidades traços de outros gases e
85 ácidos orgânicos de baixo peso molecular.

86 De acordo com Modesto (2002) nos processos anaeróbios a taxa de decomposição é
87 lenta e exige um período de tempo bem maior para a bioestabilização da matéria orgânica.
88 Isto se justifica porque nestes processos a maior parte do material orgânico biodegradável é
89 convertida em biogás. Apenas uma pequena parcela dessa material orgânico é convertida em
90 massa microbiana. Conforme Melo (2003) e Monteiro et al. (2006) a digestão anaeróbia de
91 RSU acontece pela sucessão de diferentes espécies de microrganismos, incluindo, fungos que
92 poderiam acelerar o processo de conversão de compostos como lignocelulose e celulose e
93 materiais menos complexos.

94

95 **Recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos**

96

97 Uma propriedade muito importante que está relacionada ao comportamento de aterros
98 de RSU é a deformabilidade dos resíduos ali depositados. Conforme Nascimento (2007), os
99 estudos de recalques são de grande importância para a avaliação dos componentes de um
100 aterro, tais como camadas de cobertura final, sistemas de drenagem de líquidos e gases, entre
101 outros aspectos e, ainda, para usos futuros da área (KUDRINA, 2009; SHARMA, 2007).

102 Em aterros de RSU os recalques podem ser definidos como deslocamentos verticais
103 descendentes da superfície do aterro, provocados por cargas externas, peso próprio dos
104 resíduos ou camada de cobertura e, principalmente, devido aos complexos processos de
105 degradação biológicas dos resíduos depositados com expulsão de líquidos e gases.

106 Os mecanismos de recalque ocorrem associados ao processo de recalque, de tal
107 maneira que esses mecanismos se confundem com as fases de ocorrência dos recalques
108 (CODUTO; HUITRIC, 1990). Para Melo (2003) os recalques secundários e primários podem
109 acontecer simultaneamente e que estes assentamentos da massa de resíduos se dão a
110 sucessivas rupturas de vazios.

111 Melo (2003) e McDougall et al., (2004) apresentam uma nova visão para recalques.
112 Conforme estes pesquisadores, os recalques iniciais em aterros de resíduos sólidos são mais
113 acentuados pelo fato de apresentarem maiores quantidade de matéria orgânica e, portanto,
114 maior carga. É um processo contínuo e lento com aumento sucessivos de vazios após cada
115 seção de recalques. Ainda, segundo estes autores, o que acontece é a degradação da matéria
116 orgânica acompanhada do aumento dos vazios nas partículas de resíduos. Esses vazios se
117 expandem até um determinado limite até suportarem a carga imposta pelo próprio lixo. Com a
118 degradação da matéria orgânica as partículas sólidas são convertidas em líquidos e gases,
119 portanto, os espaços preenchidos pela fase sólida são agora, ocupados pela fase líquida e
120 gasosa, devido a mudanças de fase. Assim, inicialmente, ocorrem alargamentos dos vazios
121 sucessivos devido à degradação seguidos de colapsos. Após esse período de recalques
122 intensos, tem-se um período de recalques zero, ou seja, sem recalques. Explica-se este período
123 por uma degradação da matéria orgânica com um aumento dos vazios. Entretanto as tensões
124 impostas pela massa de lixo são menores, pois, os recalques imediatamente anteriores
125 determinam uma perda de massa dos constituintes, por conseguinte, com menores recalques
126 posteriores. Contudo, assim que o peso da massa de resíduos for suficientemente grande para
127 colapsar os vazios da massa de resíduos, ocorrem novos recalques.

128 Os recalques nos resíduos sólidos são difíceis de se caracterizar quanto ao tempo de
129 sua ocorrência - recalques primários (primeiros 30 dias) e secundários posteriormente.
130 Contudo, Melo (2003) diz que ambos podem ocorrer simultaneamente, pois assim que os
131 resíduos são descartados, ocorre à colonização de microrganismos, ocasionando a perda de
132 massa.

133

134 **Composição Gravimétrica e Volumétrica de Resíduos Sólidos Urbanos**

135

136 A caracterização gravimétrica e volumétrica dos RSU é uma ferramenta importante
137 dentro da estrutura de gestão destes resíduos e serve como um indicador da quantidade que
138 cada tipo de resíduos ocupa em volume nas células do aterro (PEREIRA et al., 2010). É
139 importante salientar que também a gravimetria e volumetria dos materiais pode melhorar o
140 seu acesso aos microrganismos degradadores e, portanto, acelerar a decomposição dos RSU.

141 Conforme Pereira et al. (2010), a caracterização dos resíduos passa a ter uma maior
142 importância, pois o conhecimento individual de cada constituinte, em peso e em volume,
143 informa a quantidade da fração biodegradável existente dentro da massa de resíduos, o que
144 contribui para o correto dimensionamento dos sistemas de drenagem e tratamento de líquidos
145 lixiviados, além de avaliar o potencial de geração de biogás.

146 A composição gravimétrica permite identificar o resíduo gerado, sendo a etapa
147 inicial de qualquer definição posterior de gerenciamento e constitui uma informação
148 importante na compreensão do comportamento da massa de lixo, aterrados ou não, e expressa,
149 em percentual, a presença de cada componente, em relação ao peso total da amostra dos
150 resíduos (MELO; JUCÁ, 2000).

151 Van Meerten et al., (1995) cita, entre outros fatores, a composição gravimétrica como
152 um dos principais agentes da degradação da matéria que compõem os resíduos. Pode-se dizer
153 que tanto a composição gravimétrica como volumétrica estão diretamente ligadas ao
154 comportamento mecânico dos resíduos e afetadas pelo peso específico e compactação dos
155 resíduos. E-Fadel e Khoury (2000) afirmam que um alto peso específico inicial, associado a
156 uma maior compactação, reduz tanto o recalque final como também as taxas de recalques
157 primários e secundários.

158

159 **MATERIAIS E MÉTODOS**

160

161 **Desenvolvimento da Pesquisa**

162 A pesquisa foi desenvolvida na Universidade Federal de Campina Grande na
163 Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais em conjunto com as Unidades Acadêmica de
164 Engenharia Civil, Engenharia Química, Universidade Estadual da Paraíba (EXTRABES:

165 Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários) e, ainda em parceria
 166 com a Universidade Federal de Pernambuco, especificamente, com o Departamento de
 167 Antibióticos.

168 Para conhecer melhor o funcionamento de aterros de RSU e entender como eles
 169 sofrem perda de massa e recalque devido à decomposição dos resíduos, esforços mecânicos e
 170 processos químicos, foi confeccionada uma Célula Experimental que permite uma aceleração
 171 induzida do processo de decomposição dos resíduos de maneira controlada.

172

173 Construção do Lisímetro

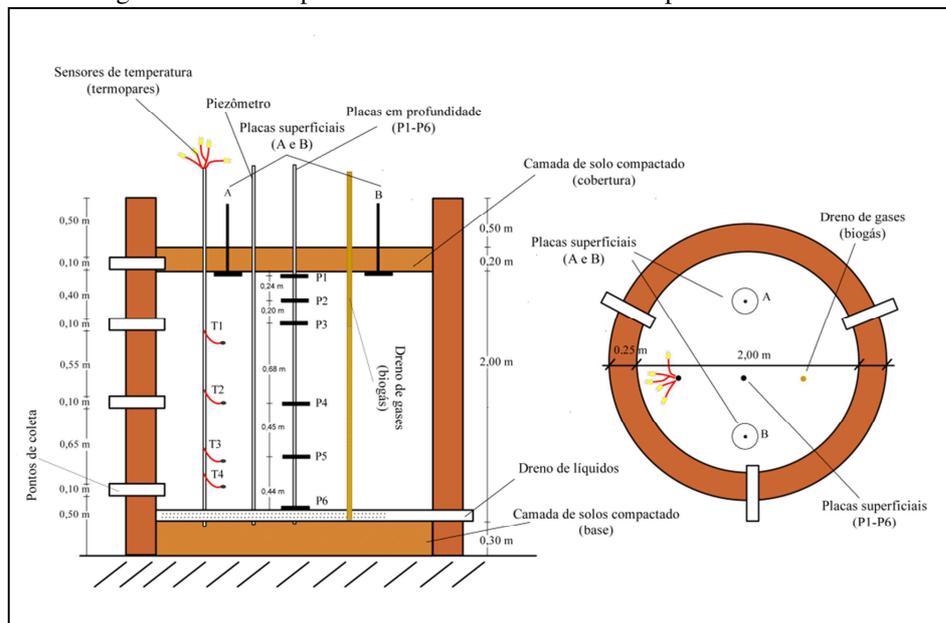
174

175 A célula experimental foi construída em alvenaria de tijolos manuais, com diâmetro de
 176 2,0m e altura de 3,0m com volume aproximado de 9m³ (Figura 1).

177

178

Figura 1 - Vista superior e corte vertical da célula experimental de RSU



179

180

181 A instrumentação foi feita com medidores de recalques superficiais (placas A e B) e
 182 em profundidade, termopares para a obtenção de dados referentes a temperatura, piezômetros
 183 para medir o nível da manta líquida e drenos de gás para quantificar o biogás gerado
 184 (Figura1). Para as camadas de base e cobertura do lisímetro foi escolhido um solo de baixa
 185 permeabilidade (velocidade: 10⁻⁸m/s) que apresentasse valores entre 10⁻⁷ a 10⁻¹⁰ m/s, exigidos
 186 normalmente em obras de aterros sanitários.

187 **Coleta, Amostragem de Resíduos e Enchimento da Célula Experimental**

188

189 Para a realização da coleta e amostragem utilizou-se o procedimento recomendado
 190 pela ABNT NBR 10.007 (2004). Após a coleta dos resíduos, foi realizada a sua
 191 homegeinização, baseada na metodologia de Lipor (2000) e adaptado por Leite (2008) e
 192 Pereira et al. (2010). Ainda de acordo com a metodologia acima foi verificada a composição
 193 gravimétrica e volumétrica do resíduos sólidos urbanos.

194 Os RSU urbanos foram coletados de três bairros que representassem a cidade de
 195 Campina Grande. Um barro de classe alta (Mirante), um bairro de Classe Média (Catolé) e
 196 outro de Classe Baixa (Sandra Cavalcante).

197 Após o processo de homogeneização e quarteamento (ABNT NBR 10.007, 2004) dos
 198 RSU provenientes da rota selecionada, foi obtida a amostra final de onde foram retiradas as
 199 parcelas para preenchimento da célula experimental.

200

201 **Monitoramento das Medições em Campo e Realização de Ensaios de Laboratório**

202

203 Foram coletadas amostras sólidas do lisímetro para determinação de parâmetros
 204 mecânicos, físico-químicos e microbiológicos. O Quadro 1 mostra os parâmetros físico-
 205 químicos monitorados ao longo do tempo da célula experimental estudada.

206

207

Quadro 1- Parâmetros físico-químicos monitorados ao longo do tempo

Parâmetros	Métodos	Laboratório
Sólidos Voláteis	Who (1979)	EXTRABES
Teor de Umidade	ABNT NBR 6457 (1986a); Manassero et al. (1996)	EXTRABES
Alcalinidade	Standard Methods (AWWA/APHA/WEF, 1998)	EXTRABES
Ph		
Alcalinidade Total		
Ácidos Voláteis		
Cloretos		
DQO		
DBO		

208

209 RESULTADOS E DISCUSSÕES

210

211 Caracterização Física dos Resíduos Sólidos Depositados na Célula Experimental

212 A caracterização física envolveu a composição gravimétrica e volumétrica dos
 213 resíduos soltos e compactados, além da determinação da massa específica solta e compactada
 214 desses resíduos. No que se refere à composição gravimétrica na Tabela 1, a matéria orgânica
 215 presente no interior da célula experimental foi de 66%, o que indica um elevado percentual de
 216 deformação da massa de resíduos e, conseqüentemente, grandes recalques, uma vez que, ao
 217 longo do tempo a biodegradação do material putrescível aumenta a fração fina do material
 218 (DIXON; JONES, 2005).

219

220 Tabela 1- Valores obtidos por meio da caracterização física dos RSU

Resíduos	Composição gravimétrica (%)	Composição volumétrica - solta (%)	Composição volumétrica - compactado (%)	Massa específica - solta (kg/m ³)	Massa específica - compactada (kg/m ³)
Plásticos	11,0	29,0	27,0	58	87
Metais	3,0	5,0	7,0	97	103
Têxteis	4,0	4,0	4,0	146	209
Outros	6,0	8,0	9,0	107	138
Vidros	4,0	4,0	5,0	157	164
Compósitos	1,0	5,0	4,0	44	80
Papel e papelão	5,0	7,0	7,0	122	169
Matéria orgânica	66,0	38,0	37,0	268	400

221

222 A Tabela 1, ainda, mostra que os plásticos atingiram um valor de 11% (percentagem
 223 em peso) do total dos resíduos. Este percentual de plásticos em relação ao teor de matéria
 224 orgânica, em termos de composição gravimétrica, reflete suas baixas massas específicas que
 225 contribuem para um menor valor em seu peso.

226 No caso da composição volumétrica, tanto a solta como a compactada, observa-se que
 227 os valores foram muito semelhantes para todos os parâmetros. No que se refere a composição
 228 gravimétrica dos plásticos e da matéria orgânica, quando comparado a sua volumetria, estes
 229 têm grande variações. Isso se dá devido à alta compressibilidade desses materiais. Segundo
 230 Grisolia et al. (1995) materiais como metais, plásticos, etc, quando submetidos à compressão,

231 podem liberar líquidos ou gases retidos, apresentando uma aparente diminuição em seu
232 volume. No caso da matéria orgânica, a sua compressibilidade é fruto dos líquidos presentes
233 em sua composição, que pode variar acentuadamente. Essas informações são importantes,
234 pois estão diretamente ligadas aos recalques e a umidade no interior da massa de resíduos.

235 Na célula experimental, a composição volumétrica da matéria orgânica, tanto solta
236 como compactada ocupou 38 e 37% respectivamente (Tabela 1). Este dado poderia,
237 inicialmente, levar a conclusão que o recalque devido à degradação da matéria orgânica seria
238 também em torno desse valor. Entretanto, McDougall et al. (2004) e Firmo et al. (2010)
239 sugerem que nem toda a matéria orgânica é biodegradável, e Melo (2003) diz que produtos de
240 inibição inerentes à própria degradação da matéria orgânica ou presentes na massa de lixo
241 disposta em aterros podem inibir ou diminuir a atividade metabólica dos microrganismos e,
242 por consequência, a decomposição dos resíduos.

243 Especificamente aos plásticos, Fucale (2002) relata que estes podem atuar em aterros
244 de RSU como matriz de reforço, sendo a composição dos resíduos semelhante a solos
245 reforçados. Os plásticos dificultam a degradação da matéria orgânica por criarem bolsões
246 impermeáveis, entretanto podem dar maior estabilidade a aterros de RSU. Pôde-se observar
247 que os plásticos dificultavam, inclusive, a retirada de amostras de resíduos, afirmando o seu
248 papel de coesão e agregação dos demais compostos no interior da célula experimental.

249 No caso dos resíduos soltos e compactados mostrados na composição volumétrica, os
250 resultados obtidos para papéis e papelões, compósitos, têxteis sanitários, vidros, metais e
251 outros totalizaram menos de 40% do volume dos resíduos indicando menor representatividade
252 na caracterização física. Mesmo assim, estes materiais apresentam valores muito elevados,
253 conforme estudos realizados por Simões e Catapreta (2008).

254 Na Tabela 1, verifica-se que a massa específica solta e compactada para a matéria
255 orgânica foi de 270kg/m^3 e 400kg/m^3 , respectivamente. Os valores de têxteis sanitários,
256 papéis e papelões são maiores para a massa específica compactada, pois após a sua
257 compactação o volume é reduzido, aumentando o valor da massa específica, o que não
258 acontece para os vidros, que não sofre alteração quanto ao seu volume solto e compactado.

259 A massa específica solta e compactada total foram de 400kg/m^3 e 700kg/m^3 ,
260 respectivamente, estando de acordo com a literatura técnica (LEITE, 2008, LANDVA;
261 CLARK, 1990; KAIMOTO; CEPOLLINA, 1996). Estes autores relatam que a massa
262 específica compactada de 700kg/m^3 é excelente para funcionamento mecânico de aterros.

263

264 **Recalques**

265

266 Recalques por Placas

267

268 Para a análise dos recalques em profundidade, foi definido que as placas que os
 269 medem estariam em ordem crescente com a profundidade (Figura 1). Conforme a Tabela 2, a
 270 posição das placas de recalques da camada de cobertura para a camada de base é levado em
 271 consideração o topo da célula experimental como o ponto de origem, assim representando
 272 valores negativos devido as placas estarem abaixo da sua origem.

273

274

Tabela 2 - Posição inicial das placas de recalques no interior da célula experimental

Placa	Posição inicial das placas de recalques (m)
Placa-a Superficial	0
Placa-b Superficial	0
Placa 1	0
Placa 2	-0,23
Placa 3	-0,43
Placa 4	-1,11
Placa 5	-1,56
Placa 6	-2,00

275

276 Durante o período de monitoramento dos recalques em profundidade e ao longo do
 277 tempo (Figura 2), verificou-se que as maiores deformações ocorreram na placa 1(0m), que
 278 fica situada no centro da célula experimental, na camada superior, seguida da placa 2. Na
 279 placa 2 foi verificado que ocorreu 0,37m de recalques e a placa 0,40m até o final de
 280 monitoramento da célula experimental.

281

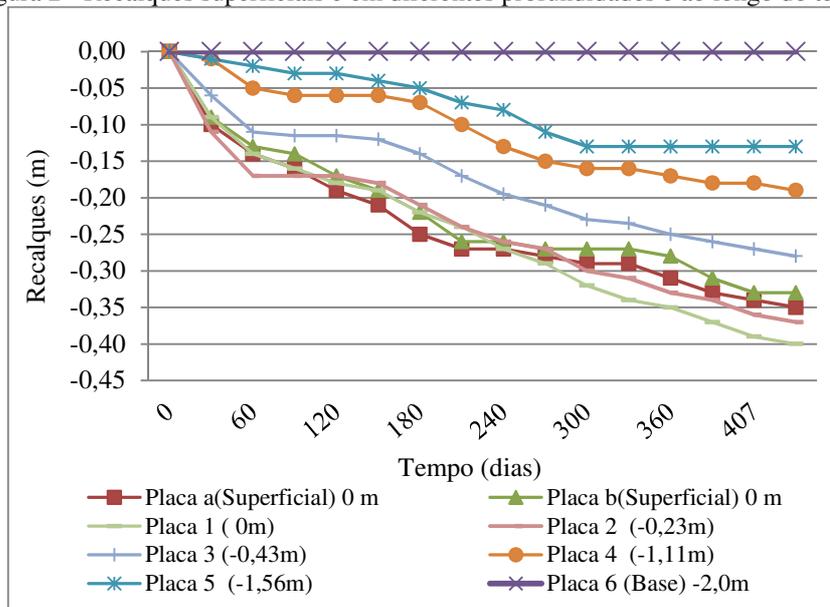
282

283

284

285

Figura 2 - Recalques superficiais e em diferentes profundidades e ao longo do tempo



286

287

288 As placas superficiais “A” (situada a esquerda da placa 1) e “B” (situada a direita da
 289 placa 1) obtiveram respectivamente 0,35m e 0,33m de recalques. Estes resultados eram
 290 previstos já que estas placas estão a 2,00m da camada de base.

291

292 Como já observado, as Placas 1 e 2 tiveram maiores recalques que as Placas
 293 superficiais que estão situadas ao lado, pois na região central da célula a influência das
 294 paredes do lisímetro são menores. Deste modo, a superfície aspera da célula, faz com que
 295 dificulte o deslizamento do resíduo sobre a parede, causando redução na magnitude dos
 296 recalques nesta região, enquanto na região central não há tanta influência. Isto foi verificado
 297 por diversos pesquisadores estudando células experimentais em tamanho reduzido e em
 tamanhos reais como Melo (2003) e Alcantara (2007).

298

299 Os recalques observados na célula experimental apresentaram um comportamento
 300 típico de células em escala real, inclusive, os recalques apresentados nas placas foram
 301 diminuindo em altura em função da profundidade (Tabela 3). Em células de escala real,
 302 Mariano (1999), Melo (2003) e Monteiro (2003) verificaram que os recalques diminuem
 303 conforme a profundidade vai aumentando. Este fator ocorre porque os resíduos nas camadas
 304 profundas são mais influenciados pela compactação devido ao peso das camadas que estão
 acima, e a espessura da camada vai diminuindo pela própria posição da placa.

305

306 Vale salientar que a placa 6 não apresentou deslocamento com o tempo por estar
 acima da camada de base que é, praticamente, incompressível.

307

308 Tabela 3 - Recalques observados nas placas durante o tempo de monitoramento da célula experimental

Placa	Recalques Finais (m)
Placa-a Superficial	0,35
Placa-b Superficial	0,33
Placa 1	0,40
Placa 2	0,37
Placa 3	0,28
Placa 4	0,19
Placa 5	0,13
Placa 6	0

309

310 Observou-se através dos dados analisados que os recalques ao longo da profundidade e
 311 do tempo corroboram com os parâmetros de pH, DQO, DBO, SV, alcalinidade e
 312 microrganismos aeróbios, anaeróbios e fungos, estão descritos nos Apêndices A, B e C. À
 313 medida que os valores de DQO, DBO e Sólidos voláteis foram decrescendo no tempo os
 314 recalques também diminuíram. As maiores taxas de recalques aconteceram nos primeiros
 315 meses de disposição dos resíduos e as maiores velocidades de recalques também ocorreram
 316 nestes dias (primeiro 90 dias de aterramento).

317 Com relação aos microrganismos presentes na massa de resíduos, à princípio não
 318 parecia haver correlação entre este parâmetro e os recalques, porém, a biota microbiana
 319 permaneceu sempre alta e a degradação dos constituintes orgânicos ocasionou os recalques.

320 Durante os primeiro 30 dias, os recalques (Figura 2) ocorreram devido ao peso da
 321 própria massa de resíduos e ao peso próprio da camada de cobertura de solo compactado. Isso
 322 ocorre porque nos dias iniciais a biota micorbiana, embora presente no interior da massa de
 323 resíduos, tem que se adaptar a este ambiente interno (VALOZER, 1989), portanto, os
 324 recalques são quase que na sua totalidade devido a fatores mecânicos, e passado esta fase,
 325 possivelmente, os recalques ocorridos foram originados pela degradação da matéria orgânica.

326 Percentagem dos recalques por Placas

327

328 Referindo-se à fração dos recalques relacionados ao teor de matéria orgânica dos
 329 resíduos (Tabela 4) as Placas superficiais “A” e “B” obtiveram 71% e 73% de participação na
 330 deformação total, respectivamente. Na Placa 1 foi observado 77% de recalques originados
 331 pela degradação da matéria orgânica e na Placa 2 foi verificado 70% devido a biodegradação.

332 As Placas 3, 4 e 5 apresentaram proporcionalmente os maiores recalques ocasionados pela
 333 degradação da matéria orgânica. Observa-se que a placa 4 chegou a 95% de seu recalques
 334 obtido pela degradação matéria orgânica.

335

336 Tabela 4 - Percentagens de recalques devido ao peso próprio de RSU e a degradação da matéria orgânica

Recalques	Placas							
	Placa-a (superficial)	Placa -b (Superficial)	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4	Placa 5	Placa 6
Recalque Imediato (%)	29	27	23	30	21	5	8	0
Recalque Devido a Biodegradação (%)	71	73	77	70	79	95	92	0

337

338 Os recalques biodegradativos são maiores proporcionalmente e diminui com a
 339 profundidade devido ao exesso de compactação das camadas mais internas e o tempo no qual
 340 ocorre os processos degradativos. Durante o enchimento da célula experimental com RSU,
 341 ocorrem os recalques imediatos devido à compactação das camadas pelo peso dos resíduos
 342 sobre elas. No entanto, as medições de recalques começam após os recalques imediatos
 343 praticamente, pois não foi possível monitorar os recalques no momento do enchimento da
 344 célula experimental.

345 Na literatura técnica fala-se de comportamento de recalques em RSU de uma maneira
 346 geral, mas não se analisa os recalques devido à fração orgânica desses resíduos, que no Brasil
 347 corresponde ao maior percentual em peso e volume dos constituintes aterrados. Para se prever
 348 o tempo de vida útil de um aterro há de se levar em conta o tempo degradativo por camada
 349 considerando, inclusive, os recalques imediatos destas camadas ao longo do enchimento do
 350 aterro.

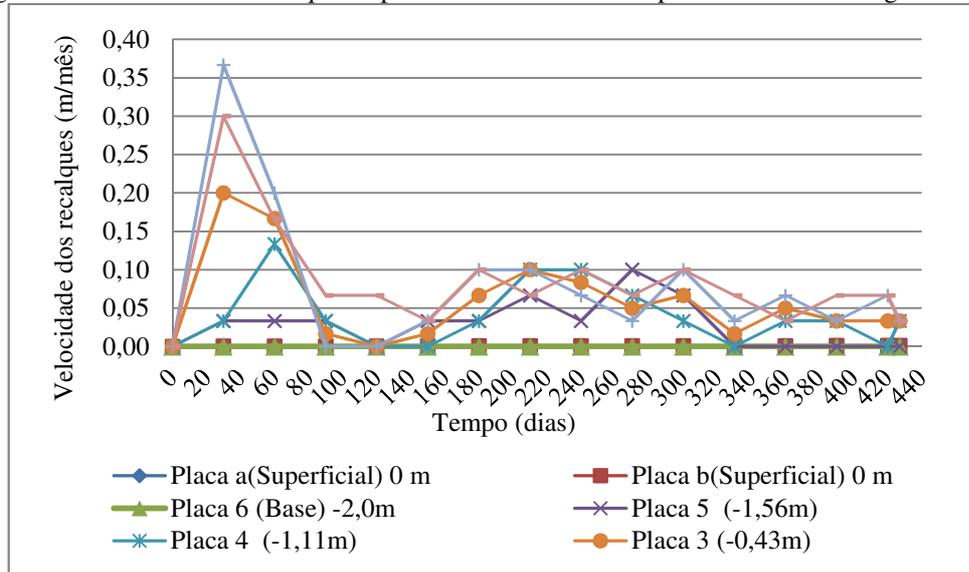
351 A velocidade de recalques (Figura 3), mostra como foram significativos os recalques
 352 ocorridos nos primeiros 30 dias. A velocidade por placa foi de até 10 vezes maior em algumas
 353 placas nos primeiros trinta dias se comparado com os demais dias de monitoramento.
 354 Contudo, os recalques passaram a ter velocidades mais baixas após 90 dias de monitoramento.
 355 As Placas 4 e 5 tiveram as menores velocidade de recalques com o tempo se relacionado com
 356 as demais placas.

357 A Figura 3 mostra Velocidade dos Recalques Superficiais e em Diferentes
 358 Profundidades ao Longo do Tempo.

359

360

Figura 3: Velocidade dos recalques superficiais e em diferentes profundidades ao longo do tempo



361

362

363

364

365

366

367

368

369

370

A Placa 5 (Figura 3) apresentou velocidades de recalques zero após 330 dias de monitoramento, indicando que, ou a matéria orgânica está inacessível aos microrganismos para a sua degradação pela compactação excessiva, ou há um acúmulo de líquidos nesta profundidade, o que dificulta os recalques. Compactação excessiva pode dificultar a passagem de líquidos e, assim a degradação de compostos orgânicos conforme Leite et al. (2007). Também, a presença de líquidos em grande quantidades nas camadas inferiores devido a falhas no sistema de drenagem poderá ocasionar a distribuição de poro-pressões nas partículas de resíduos dificultando os recalques, pois não haverá a expulsão de líquidos.

371

372

373

374

Recalques x Matéria Orgânica

375

376

377

378

379

380

A célula experimental estudada apresentou um valor de 66% de matéria orgânica o que corresponde à aproximadamente 2.900kg de compostos orgânicos, considerando a densidade dos resíduos compactados de 700kg/m³. Desta forma, pode-se estimar uma espessura de 1,33m somente de resíduos orgânicos, enquanto a altura total de RSU na célula experimental foi de 2,00m. Cabe destacar que nem toda a matéria orgânica é biodegradável.

381 No entanto, a degradação da matéria orgânica resulta em recalques e, assim, deve ser
382 quantificada, pois ela determinará o tempo de vida útil de um aterro (MELO, 2003;
383 MONTEIRO et al., 2006).

384 O teor de matéria orgânica facilmente degradável no interior da massa de resíduos da
385 célula experimental é de 400kg/m^3 , o que indica um total de 1.700kg de compostos orgânicos
386 rapidamente degradáveis. Os recalques, no primeiro momento seriam função desta matéria
387 orgânica facilmente ou moderadamente biodegradável, mas com o passar dos anos os demais
388 constituintes passariam a contribuir para a parcela dos degradáveis, porém muito lentamente.

389 Os resultados obtidos por vários pesquisadores em todo o mundo mostram que mesmo
390 a parcela rapidamente degradável dos resíduos pode levar um espaço de tempo considerável
391 para ser totalmente consumida, pois, no interior da massa de lixo há presença de compostos
392 agressivos aos microrganismos, devido à própria liberação de substâncias tóxicas do
393 metabolismo dos grupos microbianos, à heterogeneidade dos resíduos, diferentes temperaturas
394 e faixas de pH entre outros fatores (MCDOUGALL et al., 2004; MELO, 2003). Isto explica
395 porque muitos aterros produzem gases após dezenas de anos de seu fechamento.

396 O conteúdo de matéria orgânica deve ser analisado com extremo cuidado para que os
397 resultados contraditórios não ocorram, pois conforme Firmo et al., (2010), apesar dos
398 plásticos possuírem 87% de Sólidos voláteis (SV), borracha e couro 64% (SV), têxteis 98%
399 (SV) e papel/papelão 81%(SV) são considerados como moderadamente ou lentamente
400 biodegradáveis, e, ainda, contem uma elevada fração de substâncias não-biodegradáveis.

401 No que se refere ao conteúdo total de matéria orgânica na célula experimental
402 estudada, o recalque seria em torno de 0,74m, o que corresponde a 37% da diminuição de
403 altura total dos resíduos, algo que não ocorreu, pois como já descrito nem toda a matéria
404 orgânica é biodegradável, e o tempo de disposição dos resíduos (427dias), ainda, é curto se
405 comparado a células de aterros em escala real (20 a 30 anos). Através dos cálculos realizados,
406 observou-se que, os recalques totais nas Placas superficiais e Placa 1 foram em torno de 20%
407 do total de recalques observados na célula experimental, o que é muito menor se comparado
408 com os cálculos teóricos considerando somente o teor de matéria orgânica. Se forem
409 considerados os recalques ocorridos devido a compostos facilmente degradáveis (400kg/m^3)
410 este seria em torno de 0,74m. Como a célula experimental tem 2,00m de altura de RSU, estes
411 recalques corresponderiam a 37% da altura inicial de RSU, o que implicaria numa
412 deformação elevada. De acordo com os resultados encontrados na célula experimental

413 monitorada, os recalques foram muito menores que os sugeridos pelos cálculos teóricos
414 quando levando em consideração os compostos facilmente degradáveis.

415 Os estudos de recalques não levam em conta que as deformações em lixo são
416 constituídos pelos imediatos (até 30 dias de disposição dos RSU), os devido à degradação da
417 matéria facilmente biodegradável, os de difícil degradação, e passado estes recalques irão
418 ocorrer àqueles originados pelos rearranjos das partículas inertes. Todos estes recalques levam
419 um tempo considerável de 427 dias e podem determinar reduções de grandes volumes, o que
420 justifica a utilização destes locais de disposição de RSU em tempo hábil, além da geração de
421 grandes volume de líquidos lixiviado e biogás.

422 A Tabela 5 mostra a quantidade de matéria orgânica inicial em toneladas distribuída
423 na célula experimental de acordo com os extratos de RSU.

424

425

Tabela 5 - Quantidade de Matéria Orgânica (MO) por extrato de RSU

Camada de RSU	Quantidade de MO Total (kg)
Camada Superior	604
Camada Intermediária	1.000
Camada Inferior	1.300

426

427 Segundo a Tabela 5, os maiores recalques deveriam ocorrer na camada inferior, mas
428 os resultados contrariam o esperado. Pois como já visto estes recalques foram os menores,
429 embora houvesse maior disponibilidade de matéria orgânica.

430 As Figuras de 4 a 6 mostram a relação existente entre recalques e a diminuição de
431 sólidos voláteis no tempo pela ação de microrganismos. Pode-se observar que na camada
432 Superior (0 a -0,43), as deformações verticais distribuídas e verificadas nas placas de
433 recalques que a compões seguem um padrão de deslocamento muito semelhante (Figura 4). E
434 que os maiores recalques ocorreram quando a quantidade de matéria orgânica também era
435 elevada. Entretanto, os recalques continuaram acontecendo mesmo com a matéria orgânica
436 quase toda degradada após 210 dias. Isto é perfeitamente possível, já que a camada superior é
437 o somatório de todos os recalques nas camadas inferiores. Sendo assim nesta camada os
438 recalques ocorrem com o tempo devido aos recalques mais internos.

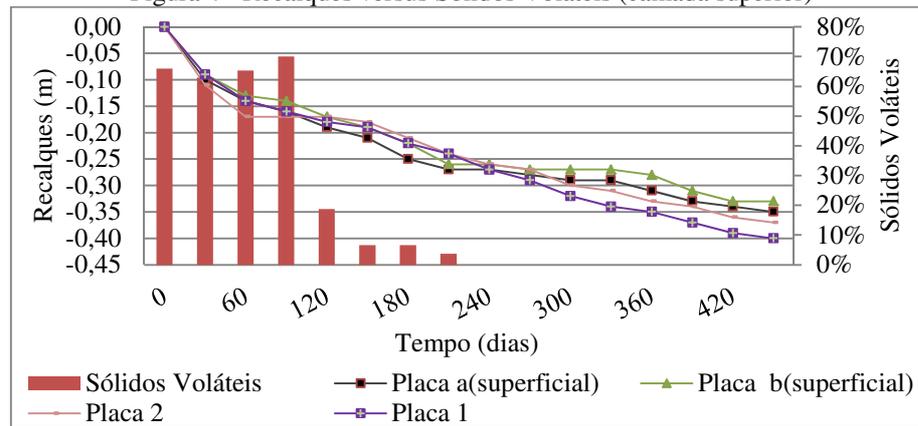
439

440

441

442

Figura 4 - Recalques versus Sólidos Voláteis (camada superior)



443

444

445

446

447

448

449

450

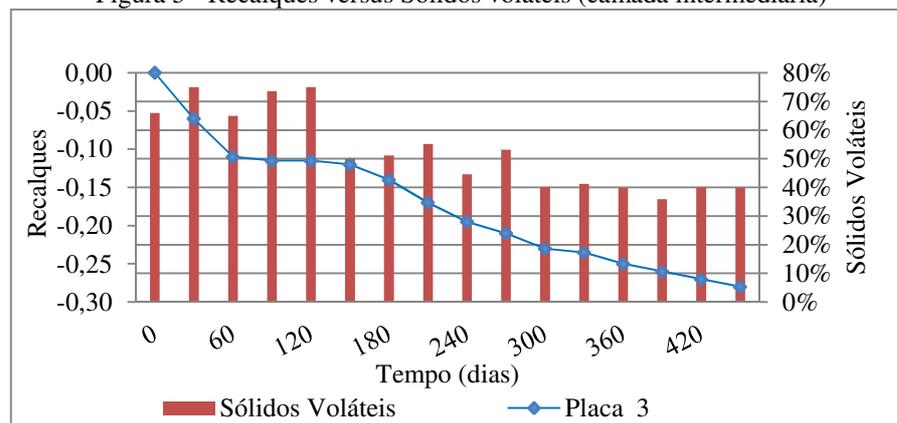
451

452

453

454

Figura 5 - Recalques versus Sólidos voláteis (camada intermediária)



455

456

457

458

459

460

461

No que se referem à camada intermediária da célula (-0,43m a -1,11m) experimental (Figura 5), os recalques tiveram uma melhor correlação com o decréscimo da matéria orgânica (SV) no tempo. Os recalques mostrados são mais acentuados nos primeiro 60 dias de monitoramento enquanto o teor de sólidos voláteis é de 50 a 70%. Após este período (entre 60 e 120 dias) ocorre a degradação da matéria orgânica com aumento de vazios, porém não o suficiente para ocorrer as deformações verticais significativas. Os vazios dos resíduos só irão colapsar quando não suportarem o peso do próprio lixo, mas para que isso ocorra, os vazios terão de aumentar em tamanho devido a degradação biológica.

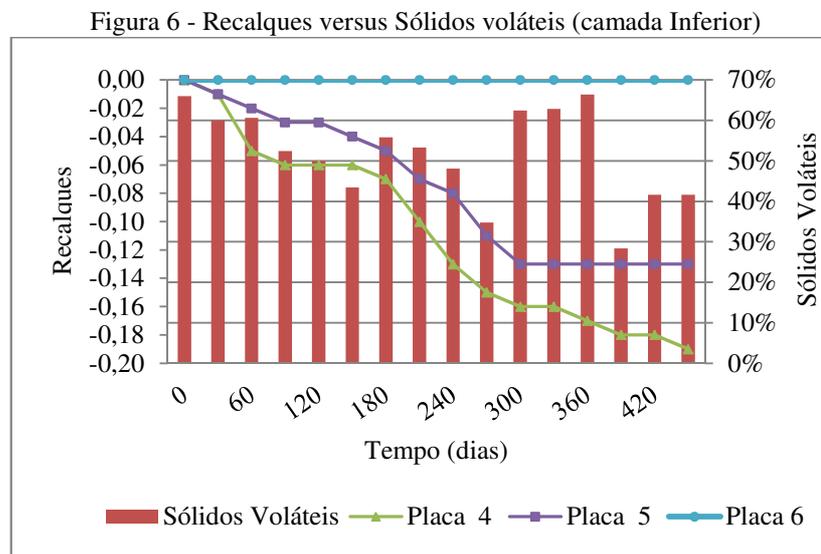
Depois de 120 dias, os recalques são contínuos, embora sejam menos acentuados. Isto ocorre devido ao consumo, também, contínuo da matéria orgânica e associado aos recalques da camada inferior. Após 120 dias correu uma diminuição gradual da matéria orgânica, passando de 50 para 40% no final de monitoramento. Os recalques durante este período foram em torno de 0,17m. Nos primeiro 60 dias ocorreu 0,11m de recalques, o que é bastante

462 acentuado se comparado aos recalques que ocorreram posteriormente no período de 120 a 427
463 dias de monitoramento.

464 Na Figura 6 têm-se os recalques ocorridos na camada inferior (-1,11m a -2,00m) que
465 possui as placas 4, 5 e 6. As placas que efetivamente recalçaram foram a 4 e a 5. Pode-se
466 observar que à medida que a matéria orgânica foi sendo consumida os recalques foram
467 ocorrendo. Os recalques iniciais, a exemplo das placas situadas nas camadas superior, também
468 foram maiores no início de monitoramento, pois também apresentavam maiores
469 concentrações de sólidos voláteis.

470

471



472

473

474 Nota-se que nos primeiros 90 dias houve deformações verticais e após este período
475 ocorreu um período de recalque zero, semelhante ao que foi verificado nas camadas
476 superiores. Após este período de não recalque, ocorreu uma outra fase de recalques que
477 correspondeu do dia 120 ao dia 300 seguido, novamente, de recalques zero. Entretanto, na
478 placa 4, este último período foi de apenas 30 dias, e após os recalques recomeçaram (330 a
479 390 dias). Na placa 5, não se observou mais recalques de 300 dias até o final de
480 monitoramento da célula experimental, possivelmente devido a compactação excessiva, já
481 que, ainda, há matéria orgânica a ser degradada. Vale salientar que na placa 4 após o dia 390
482 até o dia 420 não houve mais recalques e depois desta última análise estes recomeçaram.

483

484

485

Na camada inferior houve maiores períodos de recalques zeros (Figura 6) e isso era
esperado, pois a compactação exercida pelas camadas superiores durante o enchimento da
célula experimental implica em recalques anteriores a sua quantificação, assim, não

486 necessariamente nestas camadas há menores recalques, mas devido ao não monitoramento
487 deste parâmetro no enchimento da célula não foi possível quantificá-los em sua totalidade.

488 Durante o monitoramento dos sólidos voláteis verificou-se que na camada inferior eles
489 aumentaram em vez de decaírem, mas isto é perfeitamente possível, pois nesta camada ocorre
490 mais influência dos lixiviados que carregam consigo matéria orgânica e outros constituintes.
491 Se nesta camada o teor de sólidos voláteis estivesse correlacionado com os recalques estes
492 deveriam ocorrer de forma mais acentuada, mas isto não acontece, pois a presença de sólidos
493 voláteis, nesta camada, não estão agregados intimamente às partículas constituintes dos
494 resíduos. Entretanto, durante os primeiros 150 dias de monitoramento, os sólidos voláteis
495 estão relacionados aos recalques, pois neste período, as deformações ocorrem conforme
496 diminuem os sólidos voláteis.

497 Com relação à massa perdida de matéria orgânica no interior da célula experimental,
498 pode-se dizer que esta foi variável em cada camada. Na célula como um todo há um total de
499 $6,3\text{m}^3$ de RSU, o que corresponde aproximadamente há 4.400kg de massa de lixo, entretanto,
500 66% é matéria orgânica (2.904kg). A camada intermediária é a que melhor representa um
501 aterro segundo a literatura, pois o seu meio ambiente é mais isolado no que se refere a
502 influências das camadas superior e inferior (Melo, 2003). E nesta camada houve uma redução
503 de 60 para 40% de SV. Entretanto, a camada que mais teve degradabilidade de seus
504 constituintes orgânicos foi a superior, indicando que o ambiente interno de uma célula de
505 resíduos, seja em aterros de pequeno ou grande porte não deve ser totalmente isolada, pois
506 caso contrário diminuiria acentuadamente a velocidade de degradação dos compostos
507 orgânicos.

508 Conforme os cálculos iniciais (Tabela 6) a camada superior teve 600kg de matéria
509 orgânica transformada em gás, energia e calor o que corresponde a 93% de redução em altura
510 e volume de resíduos orgânicos. A intermediária apresentou uma redução de 40% do inicial e,
511 assim, obteve uma quantidade de matéria perdida em torno de 400kg.

512 Na camada inferior a quantidade de massa transformada foi de 500kg, o que
513 corresponde a 38% de redução da matéria orgânica. Este último resultado é bastante
514 discutível, pois este extrato de resíduos sofre influência da lixiviação de líquidos constantes e
515 esta percolação traz consigo matéria orgânica, assim estes valores podem estar mascarados.
516 Resultados semelhantes foram encontrados por Melo (2003) estudando uma célula de aterro
517 de 200m^2 no aterro da Muribeca na Região Metropolitana de Recife – PE.

518

Tabela 6 - Quantidade da Matéria Orgânica (MO) inicial e transformada em outros constituintes

Camada de RSU	Quantidade de MO Total Inicial (kg)	Quantidade de MO Total Final (kg)	Quantidade de MO Transformada (kg)
Camada Superior	604	400	204
Camada Intermediária	1.000	600	400
Camada Inferior	1.300	800	500
Total :	2.904	1.800	1.104

519

520

521

522

523

524

Na Tabela 6 vê-se que a quantidade de matéria orgânica inicial total foi em torno de 2.904kg e a quantidade final passou para 1.800kg, o que significa uma redução em torno de 39% da matéria orgânica e que coincide com os teores de SV obtidos nas camadas intermediária e inferior. Portanto, a redução em altura seria de aproximadamente de 0,66m o que perfaz 33% da altura inicial.

525

526

527

528

529

530

531

532

Pelos resultados encontrados nos recalques medidos na célula experimental as camadas superficiais apresentaram um recalque em torno de 0,35m, o que é muito menor do que corresponde ao consumo de matéria orgânica. Se for considerado só o recalque devido ao consumo de matéria orgânica na célula experimental estes ficaram em torno de 0,23m. Estes resultados à princípio parecem contraditórios, mas não o são. Pois no interior da massa de resíduos, a matéria orgânica a ser degradada e que foi degradada pode estar no interior de embalagens mais resistentes a degradação. Portanto, a diminuição da matéria orgânica no interior destas embalagens não se traduz em diminuição de altura da célula experimental.

533

534

535

536

537

538

539

No que se refere à célula experimental estudada, de uma forma geral, os resultados encontrados para a decomposição da matéria orgânica são muito superiores à células em aterro de escala real no mesmo tempo de monitoramento (MELO, 2003 e MONTEIRO et al., 2006) o que indica que células com dimensões menores podem ser mais eficazes na velocidade de decomposição da matéria orgânica, já que possuem uma área de superfície muito maior que seu volume e, assim, maiores trocas de energia e matéria com o ambiente externo.

540

541

542

543

544

545

546

Na Tabela 7 são mostrados os recalques totais levando em consideração o peso do próprio aterro e a degradação da matéria orgânica por camada.

547

Tabela 7 - Variação da altura e de quantidade de RSU no tempo e na profundidade

Camada de RSU	Altura inicial de RSU (m)	Altura Final de RSU (m)	Quantidade de RSU Inicial (kg)	Quantidade de RSU Final (kg)	Redução (%)
Camada Superior	0,43	0,40	950	880	7
Camada Intermediária	0,68	0,59	1.500	1.290	14
Camada Inferior	0,89	0,83	1.960	1.820	7

548

549

550

551

552

553

554

555

A Tabela 7 é claro em mostrar que os recalques totais da Célula Experimental são bem menores que os associados apenas a matéria orgânica, e os recalques por camadas são, também, menores que os recalques por placas. Na camada podem existir até duas placas e, portanto, os recalques devem ser calculados na camada de acordo com as diferenças de deslocamento de cada placa naquela camada, por isso os valores são menores, contudo bastante precisos. Nos recalques por camada o que de fato está recalçando é a camada como um todo e, o que interessa muito a quem projeta e faz a gestão aterros de RSU.

556

557

558

559

560

561

562

563

564

565

CONCLUSÕES

566

567

568

569

570

571

572

573

574

- Os estudos realizados permitiram concluir que os resultados encontrados nesta pesquisa através da caracterização física mostra que a matéria orgânica representa a maior parte dos resíduos (66%) gerados na cidade de Campina Grande-PB. Essa quantidade elevada de matéria orgânica é responsável pela maior parcela dos recalques ao longo do tempo e da profundidade.
- A quantidade de matéria orgânica diminuiu acentuadamente em todos os níveis pesquisados e os recalques devido a estes compostos e à fatores mecânicos se mostraram variáveis de acordo com a profundidade.

- 575 • A camada intermediária perdeu cerca de 14% em massa de RSU durante 427 dias de
576 monitoramento, implicando em grandes atividades biodegradativa nesta região e maiores
577 evoluções de recalques.
- 578 • A matéria orgânica biodegrada em 427 dias na célula experimental foi estimada em
579 torno de 39%, indicando que os recalques poderão acontecer no decorrer do tempo
580 com valores proporcionais a este mesmo período.

581

582

583

584

585

586

587

588

589

590

591

592

593

594

595

596

597

598

599

600

601 **REFERÊNCIAS**

602

603 ABNT. (1986). NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e
604 ensaios de caracterização método de ensaio. Rio de Janeiro,. 9p.

605

606 ABNT. (2004). NBR 10007: Resíduos Sólidos – amostragem de Resíduos. Rio de Janeiro,.
607 21p.

608

609 Alcântara, P. B. (2007). Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos
610 no Comportamento de Aterros Simulados. Tese (Doutorado em Engenharia Civil),
611 Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

612

613 American Public Health Association (APHA); American Water Works Association
614 (AWWA); Water Environmental Federation (WEF). (1992). Standard methods for the
615 examination of water and wastewater. 18 ed. Washington. APHA-WEF, 1193p.

616

617 American Public Health Association (APHA); American Water Works Association
618 (AWWA); Water Environmental Federation (WEF). (1998). Standard methods for the
619 examination of water and wastewater. 20a. ed. Washington: American Public Health
620 Association.

621

622 Araújo, M. V.; Melo, M. C. M.; Leite, H. E. A. S.; Araújo, E. P.; Monteiro, V. E. D. (2009).
623 Quantificação de Fungos em um Bioreator de Resíduos Sólidos da Cidade de Campina
624 Grande – PB. 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Recife, PE.

625

626 Bareither, C. A.; Breitmeyer, R. J.; Erses A. S.; Benson, C. H.; Edil, T. B.; Barlaz, M. A.
627 Relative contributions of moisture and biological activity on compression of municipal solid
628 waste in bioreactor landfills. Proceedings of the Global Waste Symposium. Copper Mountain,
629 Colorado, USA, 2008.

630

631 Catapreta, C. A. A.; Simões, G. F. (2008). Evaluation of the Relation Between Precipitation
632 and Leachate Flow in an Experimental Sanitary Landfill. XXXI Congreso Interamericano
633 Aidis, Santiago, Chile.

634

635 Coduto, D. P.; Huitric, R. Monitoring landfill movements using precise instruments.
636 Geotechnics of waste fills-theory and practice, STP 1070, Landva and Knowles (eds), ASTM,
637 West Conshocken, Pa., 1990.

638

639 Dixon, N., Jones, V. “Engineering properties of municipal solid waste”, Geotextiles and
640 Geomembranes Journal, Vol. 23, No. 3, pp. 205-233, 2005.

641

642 EL-FADEL, M. ; KHOURY, R. Modeling settlement in MSW landfills: a critical
643 review. *Critical Reviews in Environmental Science and Tecnology* 30(3), 2000.

644

645 Firmo, A. L. B.; Melo, E. S. R. L.; Guimarães, L. J. N.; Valle, G. A. (2010). Avaliação do
646 Potencial de Geração de Biogás dos Componentes dos Resíduos Sólidos Urbanos do Aterro
647 da Muribeca. 3º Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos e 2º Seminário da
648 Região Nordeste sobre Resíduos Sólidos. REDISA – Red de Ingeniería de Saneamiento
649 Ambiental. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.

650

651 Fucale, S. P. (2002). Resistência em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos. I Seminário de
652 Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Brasil.

653

654 Grisolia, M.; Napoleoni, Q.; Tancredi, G. Contribution to a technical classification of MSW.
655 In: *International Landfill Symposium*, 5. 1995, Cagliari, Italy. Proc., p. 761-768. 1995.

656

657 Kaimoto, L.S.A.; Cepollina, M. (1996). Considerações sobre alguns condicionantes e critérios
658 geotécnicos de projeto executivo de aterros sanitários. Simpósio Internacional de Qualidade
659 Ambiental, Porto Alegre.

660

661 Kudrna, Z. (2009). Long-Term Deformations of Municipal Landfill Bodies and Their Effects
662 on Functional Safety of Superficial Sealing. Charles University in Prague, Faculty of Natural
663 Science, Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics, Albertov
664 6, 128 43 Prague 2, Czech Republic. *Acta Geodyn. Geomater.*, Vol. 6, No. 4 (156), 465–473.

665

666 Landva, A. O.; Clark, J. I. (1990). Geotechnics of waste fills – Geotechnics of waste fills -
667 Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors. p. 86-103.
668 Philadelphia.

669

670 Leite, H. E. A. S. (2008). Estudo do comportamento de aterros de RSU em um biorreator em
671 escala experimental na cidade de Campina Grande – Paraíba. Dissertação (Mestrado em
672 Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB.

673

674 Leite, H.E.A.S.; Monteiro, V. E. D.; Silva, S. A. (2007). Uma proposta de estudo de recalques
675 em aterros de resíduos sólidos urbanos em escala experimental associados a biodegradação.
676 In: VI Congresso Chileno de Geotecnia. Valparaíso, Chile.

677

678 Leite, V. D. (1997). Processo de tratamento anaeróbico de resíduos sólidos urbanos inoculadas
679 com lodo de esgoto industrial. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos: USP,
680 São Carlos, 197p.

681

- 682 Lipor. (2000). Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto. Caderno
683 Técnico.
684
- 685 Mariano, M. O. H. (1999). Estudo dos Recalques no Aterro da Muribeca. Dissertação
686 (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE.
687
- 688 Mcdougall, J.R.; Pyrah, I.C.; Yuen, S.T.S.; Monteiro, V.E.D.; Melo, M.C.; Juca, J.F.T.
689 (2004). Decomposition and settlement in landfilled waste & other soil-like materials.
690 Geotechnique, ed. 54, Vol 9, 605-610.
691
- 692 Meira, R. C. (2009). Estudo biodegradativo dos resíduos sólidos urbanos da cidade de
693 Campina Grande-PB em escala experimental. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e
694 Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande.
695
- 696 Melo, M. C. (2003). Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de
697 resíduos sólidos da Muribeca. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade
698 Federal de Pernambuco, Recife, PE.
699
- 700 Melo, V. L. A.; Jucá, J. F. T. (2000). Estudos de referência para diagnóstico ambiental em
701 aterros de resíduos sólidos. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e
702 Ambiental, Porto Alegre.
703
- 704 Modesto, H. S. (2002). Estudo de escala de reatores anaeróbios de batelada tratando resíduos
705 sólidos orgânicos. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
706 Civil, UFPB, Campina Grande-PB.
707
- 708 Monteiro, V.E.D. (2003). Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento
709 do aterro de resíduos sólidos da Muribeca. Tese de Doutorado, Universidade Federal de
710 Pernambuco, Recife – PE.
711
- 712 Monteiro, V. E. D.; Melo, M. C.; Alcântara, P. B.; Araújo, J. M.; Alves, I. R. F. S.; Jucá, J. F.
713 T. (2006). Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações
714 com aspectos microbiológicos, físicos e químicos. [S.l.]: Engenharia Sanitária e Ambiental, v.
715 2, nº 3.
716
- 717 Moreda, I. L. (2000). El Asentamiento en un Relleno Sanitario y su Relación con la
718 Biodegradación. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería sanitaria y Ambiental. Porto
719 Alegre, RS.
720
- 721 Nascimento, J. C. F. (2007). Comportamento Mecânico dos Resíduos Sólidos Urbanos.
722 Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil –Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos
723 da Universidade de São Paulo.

- 724 Paiva, W. (2009) Aplicação da Estatística Para Descrever um Comportamento de um Solo
725 Expansivo. Tese de Doutorado pela Universidade Federal de Pernambuco-UFPE Programa de
726 Pós-Graduação em Engenharia Civil em Geociências. Recife PE.
- 727
- 728 Pereira, F. T. G. ; Leite, H. E. A.; Garcez, L.R. ; Araujo, E. P. ; Melo, M. C.; Monteiro, V. E.
729 D. (2010). Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina
730 Grande-PB. In: SINRES-2º Simpósio Nordestino de Resíduos Sólidos.
- 731
- 732 Sharma, H. D., De, A. (2007). Municipal solid waste landfills settlement: Postclosure
733 perspectives. J. Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE, June, 619–629.
- 734
- 735 Tortora, G.J.; Funke, B.R.; Case, C.L. (2000). Microbiologia. Editora Artimed, 6º ed. Porto
736 Alegre, RS Cap., 51, pp. 1-827.
- 737 Van Meerten, J. J.; Sellmeijer, J. B.; Pereboom, D. (1995). Prediction of Landfill Settlement.
738 Paper presented at the Sardinia 95 - 5th International Landfill Symposium, Cagliari, Italy.
- 739
- 740 Vazoller, R. F. (1989). Estudos sobre isolamento, caracterização e crescimento de culturas
741 puras de bactérias metanogênicas provenientes de biodigestores de lodo de esgoto.
742 Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Biomédicas-USP. São Paulo.
- 743
- 744 Wall D.K.; Zeiss C. (1995). Municipal Landfill Biodegradation and Settlement. ASCE J. of
745 Env. Eng., Vol. 121, Nº 3, pp. 214-223.
- 746
- 747 Who. (1979). International Reference Center for Wastes Disposal. Methods of analysis of
748 sewage sludge solid wastes and compost. Switzerland.

3.2 ARTIGO Nº2:

ANÁLISE MULTIVARIADA NO COMPORTAMENTO DOS RECALQUES EM RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS³

RESUMO: Recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos podem ser definidos como deslocamentos verticais descendentes da massa de resíduos. Deve-se salientar que os recalques em aterros são complexos, pois existem um grande número de variáveis que estão atreladas direta e indiretamente com este mecanismo. O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento de recalques em células experimentais de resíduos sólidos urbanos, associados à aspectos físico-químicos e microbiológicos. A metodologia consistiu na construção, instrumentação e enchimento de uma Célula Experimental de 9m³ com resíduos sólidos urbanos e os recalques foram analisados quanto a aspectos estatísticos e suas correlações com os parâmetros físico-químicos e microbiológicos. Conforme os resultados analisados pôde-se observar que a camada superior de resíduos obteve melhor desempenho quanto à atividade microbiana, recalques e degradações da matéria orgânica, o que justifica a concepção de aterros não isolados do meio externo. Verificou-se também, que os recalques, embora frutos da degradação biológica, nem sempre são traduzidos em recalques instantâneos, uma vez que, os resíduos podem apresentar índices de vazios crescentes decorrentes da biodegradação, que só irão resultar em colapsos quando as cargas impostas a eles não sejam mais suportadas. Concluiu-se que os parâmetros estudados influenciaram os recalques ocorridos na Célula Experimental.

Palavras-Chave: Recalque, Célula Experimental, Resíduos Sólidos Urbanos.

MULTIVARIATE ANALYSIS OF BEHAVIOR OF SETTLEMENTS IN MUNICIPAL SOLID WASTE

ABSTRACT. The settlements in solid municipal waste landfills are defined as vertical downward displacements of the waste. It is important to emphasize that the situation of these settlements in landfills is complex due to the large number of variables that are linked - directly or indirectly - to this mechanism. The aim of this study was to investigate the behavior of settlements in experimental cells of solid municipal waste associated with physical, chemical and microbiological aspects. The methodology consisted in the construction, instrumentation and filling of a 9 m³ experimental Cell with USW and the analysis of settlements for statistical aspects and their correlations with physic-chemical and microbiological parameters. According to the analyzed results, it was observed that the upper layer of waste obtained a better performance in terms of microbial activity, settlements and degradation of organic matter. It was also found that the settlements - while products of biodegradability - are not always turned into instant settlements, since the waste can present increased rates of gaps resulting from the bio degradation creating a collapse when the imposed loads are no longer supported. We concluded that the studied parameter influenced the settlements in the experimental cell.

Keywords: Statistical analysis; Environmental engineering; Landfills; Settlement.

³ Artigo submetido à Revista Waste Management / Qualis A1 – Engenharias I.

43 INTRODUÇÃO

44

45 Recalques em aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são complexos, pois
46 existem um grande número de variáveis que estão atreladas direta e indiretamente com este
47 mecanismo. Vale salientar que a engenharia geotécnica convencional define recalque como a
48 deformação vertical positiva do terreno proveniente da aplicação de cargas externas ou do seu
49 peso próprio. No caso de aterros de RSU, estes recalques podem ser definidos como
50 deslocamentos verticais descendentes da massa de resíduos, provocados por cargas externas,
51 peso próprio dos resíduos ou camada de cobertura e, principalmente, devido aos complexos
52 processos de degradação biológica dos resíduos depositados com expulsão de líquidos e
53 gases.

54 Melo (2003) relata em seus estudos que os recalques ocorridos em aterros de RSU,
55 embora sejam devidos em grande parte pela degradação biológica da matéria orgânica, são
56 influenciados pelas condições internas e externas aos aterros. Ainda, Espinace et al., (1999);
57 McDougall; Philp (2001) salientam que o aspectos relativos à perda de massa, temperatura e
58 outros fatores são indispensáveis para se entender recalques e até incorporá-los a modelos
59 matemáticos de previsões deste evento.

60 Melo (2011) salientou que pH, temperatura, umidade interna dos resíduos,
61 precipitações e a atividade metabólica pode influenciar na magnitude e velocidade dos
62 recalques. As condições hidrogeniônicas do meio, por exemplo, podem ionizar enzimas, que
63 são proteínas responsáveis pela degradação da matéria orgânica diminuindo, assim, sua
64 atividade metabólica. Vale destacar que as enzimas, ainda, podem ser inativadas ou terem sua
65 atividade metabólica reduzida pela ação da temperatura. A atividade metabólica dos micro-
66 organismo está associada diretamente com a estrutura física e química de suas proteínas, desta
67 forma, elevadas temperaturas desnaturam estas estruturas proteicas e baixas temperaturas as
68 tornam rígidas para exercerem uma atividade mais acentuada. Já as precipitações podem,
69 inclusive, fazer com que os recalques não ocorram devido ao preenchimento de vazios com
70 líquidos e com conseqüente distribuição de tensões, e isto pode ser agravado se a drenagem de
71 aterros não for adequada, conforme Mcdougall et al, (2004).

72 Todos os fatores físico-químicos, inerentes as atividades celulares, influenciam e são
73 influenciados pelo ambiente interno e externo à aterros de RSU. Assim, fica claro que os

74 recalques devido a fatores biológicos e físico-químicos são de uma maneira ou outra afetados
75 pelas condições impostas aos processos biodegradativos.

76 Estudos em células experimentais de RSU apresentam-se como uma boa alternativa
77 para se compreender o comportamento dos recalques e suas inter-relações, já que se pode pré-
78 estabelecer condições operacionais de contorno conhecidas e/ou controladas. Em diversos
79 locais do mundo e do Brasil há pesquisas sendo desenvolvidas em células experimentais das
80 mais diversas dimensões e tipos para se estudar o comportamento dos resíduos depositados,
81 levando em consideração as peculiaridades de cada região (HAYDAR; KHIRE, 2005,
82 KULKARNI et al., 2011, LEITE, 2008, CARIBÉ et al., 2013, FARIAS, 2014).

83 Assim foi construída uma Célula Experimental com volume aproximado de 9m^3
84 preenchida com RSU provenientes de bairros de diferentes classes sociais da cidade de
85 Campina Grande-PB, localizada na região Nordeste do Brasil.

86 O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento de recalques em uma Célula
87 Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos associados a aspectos físico-químicos,
88 microbiológicos e geotécnico.

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103 METODOLOGIA

104

105 Esta pesquisa foi desenvolvida na cidade de Campina Grande – Paraíba localizada no
 106 Nordeste Brasileiro, latitude: 07° 13' 50" Sul e longitude: 35° 52' 52", oeste, altitude 551 com
 107 área de 594.182 Km², localizada a 112 km da capital do estado, João Pessoa- PB, conta com
 108 uma população de aproximadamente 400 mil habitantes (IBGE, 2013), conforme apresentado
 109 na Figura 1.

110

111 Figura 1: Localização geográfica da cidade de Campina Grande – PB(localizado na costa leste do Brasil,
 112 Paraíba



113

114

Fonte: Secretaria de Planejamento da cidade de Campina Grande (2010)

115

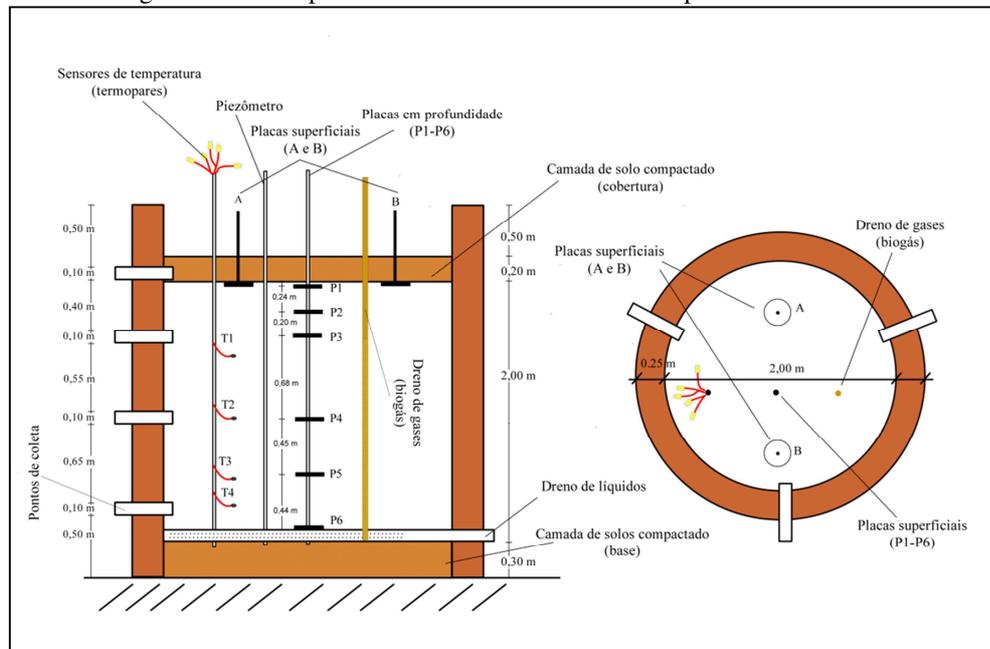
116 Para esta pesquisa foi construída uma Célula Experimental em alvenaria de tijolos
 117 manuais, com diâmetro de 2,0m e altura de 3,0m e com volume aproximado de 9m³,
 118 apresentando aberturas laterais denominadas pontos de coletas de resíduos, distribuídos ao
 119 longo de diferentes níveis de profundidade, considerados como nível superior, intermediário e
 120 inferior. A Célula Experimental ainda foi instrumentada com medidores de recalques
 121 superficiais (Placas A e B) e em profundidade (P1 a P6), termopares para a obtenção de dados
 122 referentes a temperatura, piezômetros para se medir o nível da manta líquida e drenos de gás
 123 para quantificar o biogás gerado (Figura 2). Para as camadas de base e cobertura da Célula

124 Experimental foi escolhido um solo com características de baixa permeabilidade (velocidade:
125 10^{-8} m/s).

126

127

Figura 2: Vista superior e corte vertical da Célula Experimental de RSU



128

129

130 Conforme a Figura 2, as placas de recalque em profundidade (P1 a P6) estão dispostas
131 de tal maneira que da Placa 1 (P1) até a Placa 3 (P3), corresponde ao nível de profundidade
132 superior, entre as Placas 3 (P3) e 4 (P4) o nível de profundidade intermediário e entre as
133 Placas 4 (P4) e 6 (P6) o nível inferior. Salienta-se que as placas superficiais (Placas A e B),
134 localizam-se no nível superior dos resíduos e abaixo da camada de cobertura de solo
135 compactado.

136

137 **Coleta e enchimento da célula experimental**

138

139 Para a realização da coleta e amostragem utilizou-se o procedimento recomendado
140 pela ABNT NBR 10.007 (2004). Os RSU provenientes da cidade de Campina Grande-PB-
141 Brasil foram coletados de bairros de três diferentes classes sociais denominados classe baixa,
142 média e alta, a fim de representar os resíduos gerados na cidade. Os bairros das diferentes
143 classes sociais foram selecionados através de dados obtidos junto a Diretoria de Limpeza
144 Urbana da Prefeitura Municipal da cidade de Campina Grande- PB- Brasil.

145 Após a coleta domiciliar destes resíduos, o caminhão compactador foi descarregado
146 nas dependências físicas da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e realizado o
147 processo de homogeneização, quarteamento (ABNT NBR 10.007, 2004) dos RSU, sendo
148 obtida a amostra final, de onde foram retiradas as parcelas para preenchimento da Célula
149 Experimental.

150

151 **Medições *in situ* e Realização de Ensaios de Laboratório**

152

153 Foram coletadas amostras sólidas de RSU na Célula Experimental para determinação
154 de parâmetros mecânicos, físico-químicos e microbiológicos. Os parâmetros físico-químicos
155 monitorados ao longo do tempo e profundidade da Célula Experimental estudada foram
156 realizados de acordo com as seguintes literaturas e normas técnicas: Teor de Umidade e
157 Sólidos voláteis de acordo Who (1979), e Alcalinidade Total, pH, DQO, DBO, Ácidos Graxos
158 e Cloretos pelo Standard Methods (AWWA/APHA/WEF, 2012).

159

160 **Análise Estatística**

161

162 Durante a confecção deste trabalho fez-se uma análise descritiva dos principais
163 parâmetros associados aos recalques ocorridos na Célula Experimental. Foram analisados a
164 média, desvio padrão e o coeficiente de variação.

165 Por fim, procedeu-se Análise em Componentes Principais (ACP) que consiste em
166 reescrever as coordenadas das amostras em outro sistema de eixos que melhor explique a
167 variabilidade dos dados encontrados no monitoramento da Célula Experimental. O estudo
168 estatístico multivariada em componentes principais foi realizado, inicialmente, com a geração
169 de uma matriz de correlação com todas as variáveis envolvidas no processo e divididas por
170 camadas para verificar o nível de relação entre as variáveis.

171 Utilizou-se o critério de excluir aquela variável que não apresentasse uma correlação
172 de 70% com pelo menos duas outras variáveis. Em seguida, procedeu-se, a ACP para
173 verificação da formação dos grupos de variabilidades equivalentes e, assim, avaliar a
174 dispersão entre esses dados. Além disso, foram analisados os parâmetros, tais como: Teor de

175 Umidade, Teor de Sólidos Voláteis, DBO, DQO e Recalques no intuito de verificar o
176 comportamento dos dados quando a média, desvio padrão e coeficiente de variação.

177

178 **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

179

180 Os recalques na Célula Experimental foram analisados com base em ferramentas
181 estatísticas para estabelecer inter-relações entre os parâmetros físico-químicos e os
182 deslocamentos verticais descendentes.

183 Paiva (2009), estabelece limites para avaliar a dispersão dos dados com relação ao
184 coeficiente de variação (CV). O autor define que, para um CV menor ou igual a 15%, os
185 dados se enquadram na classificação de baixa dispersão, já para o coeficiente de variação
186 entre 15 e 30% implica em uma média dispersão e, se maior que 30% em alta dispersão. Estes
187 intervalos podem ser observados na Tabela 1, a qual apresenta os dados selecionados a partir
188 da relevância em processos biodegradativos na camada superior, estando situada entre as
189 Placas 1 e 3 e, separada do meio externo por uma camada de solo compactado de 200mm de
190 espessura. Pôde-se observar que as variáveis Sólidos Voláteis, Teor de Umidade e DBO
191 apresentaram um alto coeficiente de variação, o que corresponde a uma grande variabilidade
192 dos dados. Por outro lado, a variável DQO apresentou média dispersão de variabilidade
193 intermediária. Isso mostra a influência do meio ambiente externo sobre os parâmetros
194 estudados, se comparado às camadas intermediária e inferior (Tabelas 2 e 3).

195

196 Tabela 1: Análise descritiva dos principais parâmetros associados aos recalques - camada superior

Variáveis	Camada Superior		
	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Teor de Umidade	30,52	24,34	79,75
Sólidos Voláteis	37,52	30,93	82,44
DBO	2534,38	1374,12	54,22
BQO	30179,37	7750,37	25,68

197

198 Os resultados apresentados na Tabela 2, que corresponde à camada intermediária de
199 resíduos localizada entre as Placas 3 e 4, mostram menor dispersão se comparados aos dados
200 apresentados na camada superior.

201 Tabela 2: Análise descritiva dos principais parâmetros associados aos recalques -camada intermediária

Variáveis	Camada Intermediária		
	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
Teor de Umidade	49,99	10,89	21,78
Sólidos Voláteis	64,97	15,08	23,21
DBO	2733,57	1227,05	44,89
BQO	26448,64	12406,4	46,91

202

203 Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam que o meio ambiente externo à Célula
 204 Experimental pode exercer menor influência sobre os parâmetros estudados quando
 205 comparado a camada superior. Mesmo assim, devido a grande área superficial da Célula
 206 Experimental em relação ao seu volume interno, há uma certa influência do meio externo em
 207 todas as camadas analisadas. Desta forma, projetar aterros de RSU que não sejam totalmente
 208 isolados do ambiente, pode representar uma alternativa interessante para o favorecimento da
 209 degradação dos resíduos em um menor espaço de tempo. Moreda (2000) confirma que um
 210 aterro de RSU para ser funcionalmente eficiente precisa estar em contato com o meio
 211 ambiente. Este contato não é a exposição livre dos resíduos (lixão), mas sim uma exposição
 212 controlada através de camadas de solo compactado que oferecem o mínimo de trocas de
 213 energia e matéria com o meio externo.

214 Reddy (2006), relata também, que células de aterros de RSU com menores dimensões
 215 facilitam a degradação da matéria orgânica, pois, as trocas de energia e matéria se dão em
 216 taxas de velocidades maiores. Por outro lado, EPA (2003) relata que se ocorrer à perda de
 217 calor interno de uma célula de aterro para o meio ambiente externo as taxas de biodegradação
 218 caem. Inclusive em aterros profundos, o calor gerado pela biodegradação da matéria orgânica é
 219 mantido, fazendo com que o processo degradativo seja mais rápido nestes aterros do que em
 220 aterros rasos. Assim, fica claro que a dimensão e até mesmo o formato de aterros deve ser
 221 melhor compreendido para se definir quais as dimensões ideais para favorecer as taxas
 222 biodegradativas e que tipo de tratamento se deve prevalecer: aeróbio ou anaeróbio.

223 Na Tabela 3, que corresponde à camada inferior, a qual está localizada entre as Placas
 224 4 e 6, pôde ser observado que há uma menor dispersão dos dados, de um modo geral, se
 225 comparados às camadas acima. Isto indica que o isolamento ao meio ambiente foi maior nesta
 226 camada.

227

228 Tabela 3: Análise descritiva dos principais parâmetros associados aos recalques –camada inferior

Variáveis	Camada Inferior		
	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
Teor de Umidade	52,55	7,01	13,34
Sólidos Voláteis	51,7	12,38	23,95
DBO	2709,86	1155,56	42,64
BQO	27174,5	8155,57	30,01

229

230 Nota-se, na Tabela 3, que o coeficiente de variação para o teor de umidade foi de
 231 13,34%, indicando uma baixa dispersão. Assim, verifica-se que o teor de umidade foi o
 232 parâmetro mais afetado pelo ambiente externo nas camadas superiores, o que não ocorreu na
 233 camada inferior, isto é decorrente do processo de lixiviação dos líquidos e também pelo fato
 234 de haver maior isolamento nas camadas mais profundas de resíduos em relação ao meio
 235 externo, o que implica em menores taxas de trocas de energia e matéria com o ambiente.

236 Cabe destacar que os valores de DBO, ao contrário dos outros parâmetros,
 237 apresentaram decrescentes valores de coeficiente de variação ao longo da profundidade na
 238 célula experimental. Desta forma, a camada superior, intermediária e inferior apresentou
 239 valores de 54,22; 44,89 e 42,64% respectivamente (Tabela 1, 2 e 3). Estes valores mostram
 240 que a demanda de oxigênio para a degradação de matéria orgânica é bastante variável,
 241 principalmente nas camadas mais próximas ao solo compactado de cobertura. Apesar destes
 242 coeficientes de variação apresentar altas dispersões devido ao consumo de matéria orgânica,
 243 existe a possibilidade de migração destes para as camadas inferiores na célula experimental,
 244 fazendo com que eleve a média das concentrações de DBO (Tabela 1, 2 e 3) em determinados
 245 períodos. Isto ocorre devido à compensação de matéria orgânica biodegradável nas regiões
 246 mais profundas, o que foi justificado pelas baixas dispersões nas camadas próximas ao solo
 247 compactado de base e a tendência na redução dos valores de desvio padrão, assim
 248 apresentando certa constância dos dados.

249 Conforme Alves (2012), as condições meteorológicas da Cidade de Campina Grande-
 250 PB- BRASIL remetem a uma Tabela de déficit hídrico, o que sugere uma maior taxa de
 251 evaporação se comparado à precipitação. Assim, o teor de umidade das camadas superior e
 252 intermediária de resíduos vai diminuindo rapidamente com o tempo, pois as trocas com o
 253 meio ambiente são maiores. Estes resultados propõem que um aterro em escala real nesta
 254 cidade, talvez pudesse utilizar a técnica de recirculação de lixiviados como fonte de umidade
 255 para acelerar o processo degradativo da matéria orgânica.

256 Reddy e Kulkarni (2010) realizaram um estudo para otimizar a distribuição de
257 umidade em um aterro sanitário utilizando biorreator de trincheiras horizontais. Os seus
258 estudos indicaram que é importante criar um ambiente ótimo para biodegradação de RSU com
259 um teor de umidade entre 60-80% e que isto, pode ser controlado pela injeção intermitente de
260 lixiviado. Desta forma, fica claro que a introdução de umidade no interior da massa de
261 resíduos é necessária para que o processo degradativo ocorra de maneira satisfatória. Já
262 Palmisano e Barlaz (1996) relatam em seus trabalhos um teor de umidade, para melhor
263 atividade microbiológica, entre 20 e 40% e Bidone e Povinelli (1999) apontam uma faixa
264 ideal entre 40 e 60%. Na célula experimental em estudo o teor de umidade na massa de
265 resíduos do nível superior, intermediário e inferior ficou em média de 30,52; 49,99 e 52,55%
266 respectivamente (Tabelas 1, 2 e 3), o que favoreceu a atividade microbiana nas camadas mais
267 profundas, embora não se tenha observado a presença de lixiviados durante o monitoramento
268 e ainda, o ambiente externo favoreça a evaporação dos líquidos internos. Vale salientar que os
269 resíduos sólidos já vêm agregado com elevado teor de umidade, justificado pela presença
270 significativa de matéria orgânica, que está em uma faixa de 50 - 65% (RIBEIRO, 2012).

271

272 Análise de Componentes Principais (ACP)

273

274 Analisando as Figuras 3, 4 e 5 verifica-se que a primeira componente principal,
275 correspondente ao Fator 1 e a segunda componente principal, Fator 2, cujo o somatório,
276 superior a 80%, explicam de forma satisfatória o processo biodegradativo da célula estudada
277 ao longo do tempo e profundidade. Paiva (2009) diz em seus trabalhos que se a soma das duas
278 primeiras componentes principais for superior a 70%, a ACP explica bem a variabilidade do
279 processo de degradação.

280 Analisando individualmente cada camada de resíduo pôde-se realizar a ACP
281 considerando grupos de variáveis que estão relacionadas entre si. A ACP da camada superior
282 (Figura 3) mostra a formação de 3 grupos correlacionados mais intimamente os quais são
283 formados com elementos de dispersão semelhante.

284 De acordo com a Figura 3 verifica-se que no grupo 1 há uma estreita correlação entre
285 os recalques na camada superior e o tempo de monitoramento (dias), uma vez que, os
286 recalques acontecem naturalmente ao longo do tempo. O grupo 2, que se refere aos sólidos

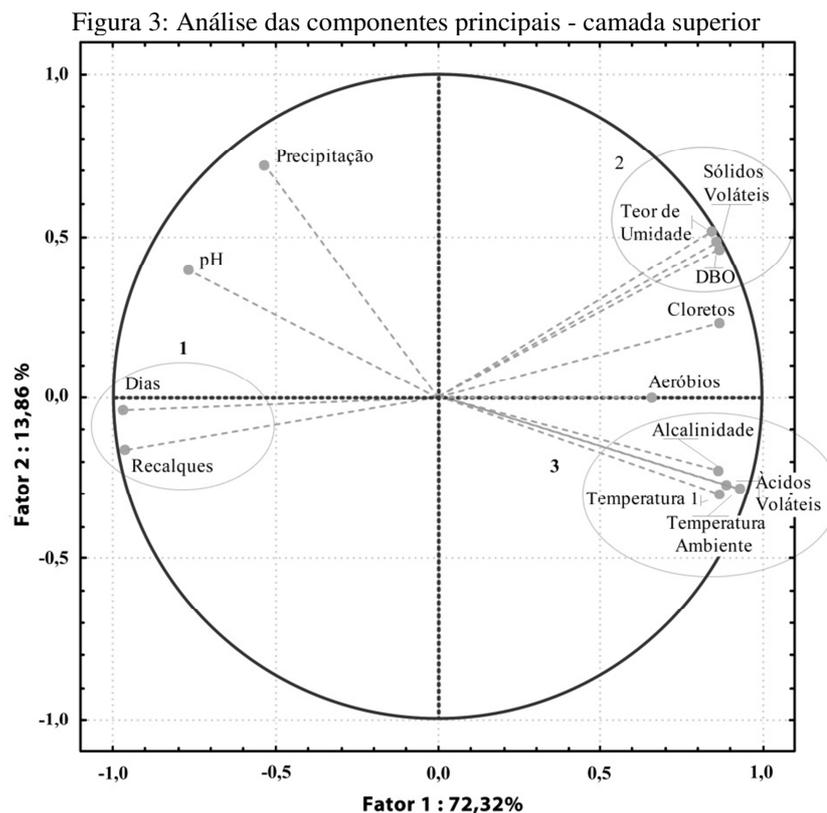
287 voláteis, teor de umidade e DBO mostram uma relação negativa se comparado ao grupo 1,
 288 pois estão plotados em direções opostas.

289 Vale salientar que os sólidos voláteis indicam indiretamente se há umidade no interior
 290 da massa de resíduos, pois a matéria orgânica pode conter até 60% de água. Logicamente, se o
 291 teor de sólidos voláteis cair, a DBO cai e conseqüentemente a umidade. Ainda, salienta-se,
 292 que a umidade acompanhou estes outros dois parâmetros (DBO e Sólidos voláteis) pelo fato
 293 de não ser influenciada de maneira incisiva pelas condições meteorológicas locais, como já
 294 foi relatado, o município de Campina Grande- PB- BRASIL apresenta déficit hídrico.

295 A temperatura 1 (T1) por estar mais próxima à superfície (Figura 2) e isolada pela
 296 camada de cobertura de 0,20m de espessura, devem ser bastante semelhantes quando
 297 comparadas as temperaturas externa.

298

299



300

301

302 O que destoa do que realmente deveria ser observado na camada superior é que a
 303 alcalinidade deveria ter um comportamento oposto aos dos ácidos voláteis. Pois à medida que
 304 os ácidos voláteis vão diminuindo a alcalinidade deveria ir aumentando. Quanto aos dados de
 305 pH, precipitação, cloretos e aeróbios a correlação foi muito pequena. Houve, entretanto, maior

306 relação com pH e precipitação. Estudos mostram que o pH (Melo, 2003) é diretamente
307 influenciado pela precipitação, pois a água das chuvas pode trazer consigo oxigênio e gás
308 carbônico, que tem um caráter ácido e, portanto, modificar o pH.

309 Deve-se salientar que a taxa de degradação dos resíduos é controlada pela quantidade,
310 pelos tipos de materiais degradáveis, pela temperatura, pela umidade presente, e por outros
311 fatores. Resíduos de alimentos podem degradar cinco vezes mais rápido do que resíduo de
312 jardim, quinze vezes mais rápido do que resíduo de papel, e cinquenta vezes mais rápido do
313 que madeira ou couro (EPA, 2003). É importante, relatar que na Célula Experimental
314 estudada o teor de matéria orgânica encontrado foi superior a 65%, indicando que a
315 velocidade de biodegradação seria rápida em relação a aterros com pouca carga orgânica.

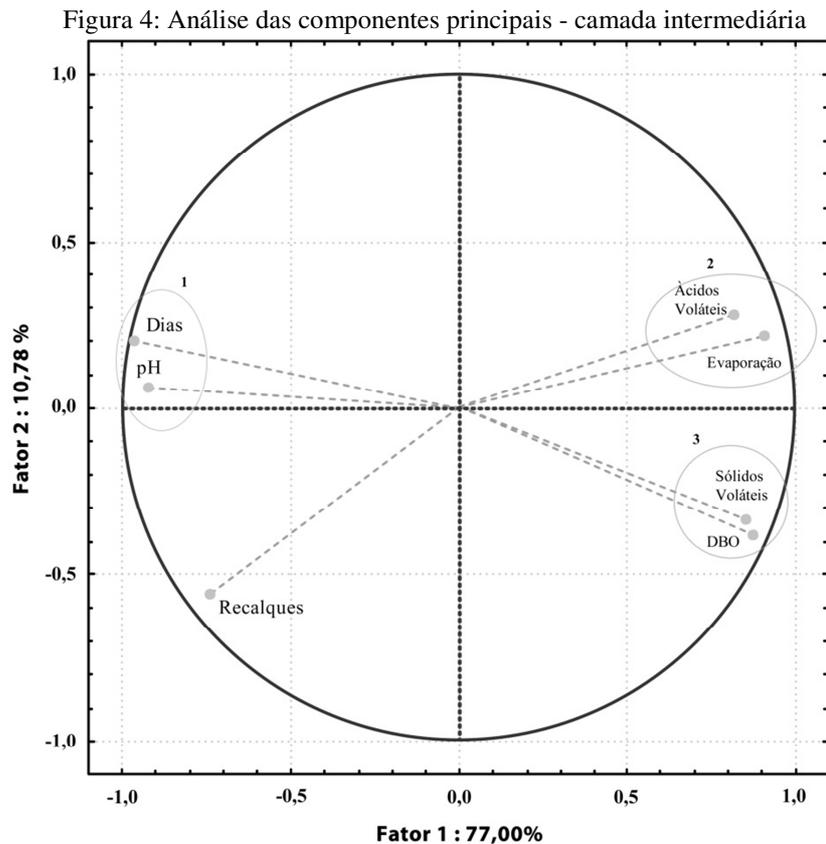
316 Correlações negativas também ocorreram na camada superior (Figura 3). O grupo 1 é
317 diametralmente oposto aos quadrantes onde estão inseridos os grupos 2 e 3. Isto também era
318 esperado, pois à medida que os recalques na camada superior vão ocorrendo, o teor de sólidos
319 voláteis, DBO, umidade, ácidos voláteis devem decair. Entretanto o grupo 1 é próximo,
320 embora, pouco relacionado ao pH, pois conforme os dias decorrem o pH vai aumentando em
321 função da maturação da Célula Experimental.

322 No caso específico de recalques, o ideal é que ocorra uma correlação negativa (os
323 parâmetro plotados estão em direção oposta no gráfico) com DBO, DQO e sólidos voláteis,
324 pois à medida que as deformações acontecem os índices físico-químicos como os
325 relacionados à variação de matéria orgânica devem diminuir e, isto evidencia que o processo
326 biodegradativo está ocorrendo. Entretanto, a DBO e Sólidos Voláteis (SV), nas Figuras 3 e 4
327 embora fazendo correlações negativas com os recalques, o que é esperado, não estão
328 totalmente relacionadas, pois à medida que a DBO e SV descaíssem, esperava se que na
329 mesma proporção ocorressem os recalques. Segundo Boni et al., (2006), a biodegradação
330 aumenta o índice de vazios, o que gera recalques pelo enfraquecimento da força estrutural do
331 aterro. Porém, o aumento de vazios não gera deformações instantâneas. Somente ocorrerão
332 recalques quando estes vazios não suportarem o peso dos resíduos a eles impostas, ocorrendo
333 rupturas e como consequência os recalques. Assim, é esperado que não ocorram correlações
334 perfeitas entre recalques e DBO.

335 Na ACP da camada intermediária (Figura 4) também ocorre a formação de 3 grupos
336 correlacionados mais intimamente e uma variável mais isolada. Assim, verifica-se que há uma
337 correlação positiva mais íntima entre dias e pH do que dias e recalques. Entretanto, o grupo 1
338 está fracamente, mas mesmo assim correlacionado aos recalques nesta camada.

339

340



341

342

343 Já no que se refere aos sólidos voláteis e DBO (grupo 3), da camada intermediária,
 344 observa-se que este está correlacionado negativamente com grupo 1, o que também ocorreu
 345 na camada superior. Ainda, o grupo 3 mostra a correlação positiva entre os dados de ácidos
 346 voláteis e evaporação que estão inseridos no grupo 2.

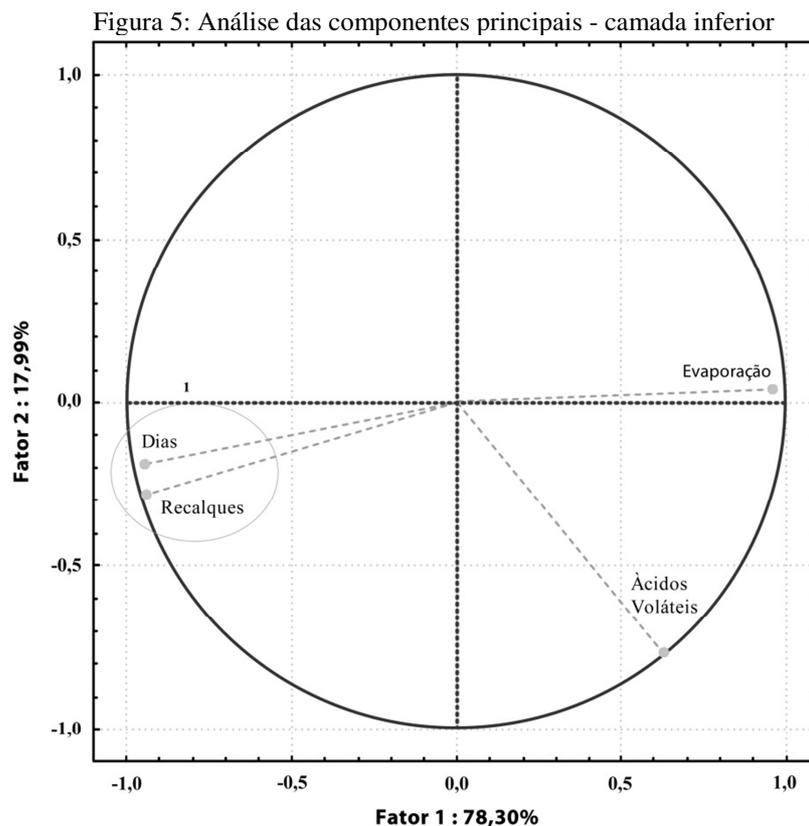
347 Na ACP da camada inferior (Figura 5) ocorre a formação de 1 grupo e duas variáveis
 348 mais isoladas. A camada inferior apresenta dados menos correlacionados estatisticamente que
 349 as demais camadas. Deve-se ressaltar que isto ocorre devido a este extrato de resíduos ser
 350 menos influenciado pelo ambiente externo que os demais extratos, como já comentado.
 351 Contudo, é importante frisar que os extratos inferiores de resíduos são influenciados pelos
 352 produtos oriundos dos extratos superiores através do processo da lixiviação.

353 No que se refere aos recalques no extrato inferior de resíduos e dias há uma correlação
 354 positiva, como nas demais camadas. O grupo 1 está relacionado negativamente com os dados
 355 de evaporação, pois em Campina Grande-PB- BRASIL há um déficit hídrico como já foi
 356 abordado nos itens anteriores. Mas de certa forma a evaporação pode facilitar os recalques,
 357 pois estes ocorrem devido à expulsão de líquidos e gases. Por outro lado, a evaporação

358 excessiva pode inibir a biodegradação da matéria orgânica (MELO, 2003; McDOUGALL
 359 et.al., 2004). Talvez em aterros de escala real, em Campina Grande-PB-BRASIL sejam
 360 necessárias a recirculação de lixiviados, e conforme (O'KEEFE; CHYNOWETH, 2000) esta
 361 reintrodução de lixiviados deve ser adequada para não suprimir a capacidade tampão do
 362 sistema e inibir, principalmente, a atividade metanogênica, pois bactérias metanogênicas são
 363 sensíveis a quantidades excessivas de teores de umidade.

364

365



366

367

368 Desta forma o teor de umidade tem um papel decisivo na biodegradação da matéria
 369 orgânica na Célula Experimental estudada por facilitar a difusão de substrato da massa de
 370 resíduos no interior de um aterro, bem como em condições ideais de temperatura e pH podem
 371 facilitar a atividade enzimática. Por outro lado, a umidade pode, também, difundir substâncias
 372 tóxicas no interior da massa de resíduos e se esta umidade for excessiva, ainda, pode dificultar
 373 os recalques, principalmente, se a drenagem for insuficiente, como foi o caso estudado por
 374 Melo (2003) em uma célula de aterro de resíduos sólidos urbanos na Região Metropolitana do
 375 Recife- PE- BRASIL.

376 Na Célula Experimental estudada observou-se que as correlações estatísticas indicam
377 que as condições externas influenciaram nos parâmetros analisados, uma vez que, à medida
378 que as camadas de resíduos vão aumentando em profundidade sofrem menos influência do
379 meio externo, como indicam os coeficientes de variação obtidos.

380

381 **CONCLUSÕES**

382

383 Os resultados obtidos mostram a relação que os recalques medidos na Célula
384 Experimental têm com os demais parâmetros, e como as condições ambientais e geométricas
385 podem influenciar no comportamento geral da biodegradabilidade dos resíduos em aterros,
386 direcionando a tomada de decisões, a elaboração de projetos, desenvolvimento de modelos
387 estatísticos e matemáticos baseados nas condições locais e servindo de indicativo para
388 melhores opções em aterros de escala real.

389 De acordo com os resultados analisados, a camada superior obteve significativos
390 coeficientes de variação, acima de 30%, indicando altas dispersões sendo, portanto, bastante
391 influenciada pelo meio externa em relação às demais camadas.

392 Estes dados mostram que as camadas de resíduos, as quais apresentam maior área
393 superficial em relação ao seu volume interno, indicaram melhores atividades microbianas,
394 degradações da matéria orgânica e recalques, o que justifica a concepção de aterros não
395 isolados do meio externo, embora mais estudos devam ser desenvolvidos a fim de determinar
396 qual a real importância da relação área de superfície/volume.

397

398 **REFERÊNCIAS**

399

400 **ALVES. F.S. Influência das Condições Meteorológicas na Biodegradação dos Resíduos**
401 **Sólidos Urbanos em Campina Grande-PB.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia
402 Civil e Ambiental -Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2012.

403

404 American Public Health Association (APHA); American Water Works Association
405 (AWWA); Water Environmental Federation (WEF). **Standard methods for the examination**
406 **of water and wastewater.** 22a. ed. Washington: American Public Health Association, 2012.

407

- 408 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: **Amostras de solo -**
409 **Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização método de ensaio.**
410 Rio de Janeiro, 1986a. 9p.
411
- 412 NBR 10004: **Resíduos Sólidos – classificação.** Rio de Janeiro, 2004a. 74p.
413
- 414 NBR 10007: **Resíduos Sólidos – amostragem de Resíduos.** Rio de Janeiro, 2004c. 21p.
415
- 416 BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos Básicos de Resíduos sólidos**, 1ª ed, v.1, São
417 Carlos, EESC-USP, 1999.
418
- 419 Boni, M. R., Chiavola, A., Sbaffoni, S. **Pretreated waste landfilling: relation between**
420 **leachate characteristics and mechanical behaviour.** Waste Management Journal, Vol. 26,
421 Issue 10, pp: 1156 – 1165, 2006.
422
- 423 CARIBE, R. M., et. al. **Influência das Concentrações de Matéria Orgânica no**
424 **Comportamento dos Recalques em Células Experimentais de Resíduos Sólidos Urbanos.**
425 In: Conferência Internacional de Gestão De Resíduos na América Latina, 3. 2013, São Paulo.
426 Anais GRAL 2013. São Paulo: Informamídia Comunicação, 2013. v. 1. CD-ROM.
427
- 428 EPA. **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2001**, USA, 15 abril
429 .2003.
430
- 431 ESPINACE R., PALMA J., SÁNCHEZ-ALCITURRI J.M. **Experiencias de Aplicación de**
432 **Modelos para la Determinación de los Asentamientos de Rellenos Sanitarios**, XI
433 Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Foz de Iguazu,
434 Brasil. (1999).
435
- 436 FARIAS, R. M. de S. **Estudo dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos: uma**
437 **abordagem estatística e experimental.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil
438 e Ambiental -Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2013.
439
- 440 HAYDAR, M.M., AND KHIRE, M.V. (2005). **“Leachate recirculation using horizontal**
441 **trenches in bioreactor landfills”**, J. Geotechnical and Geoenvironmental Engrg. 131(7): 837-
442 847.
443
- 444 IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contagem Populacional.** 2013.
445
- 446 KULKARNI, H. S., BABU, G. L. S. AND REDDY, K. R., **“Reliability Analysis of**
447 **Moisture Distribution in Bioreactor Landfills”**, in Geo Risk – Risk Assessment and

- 448 Management in Geoengineering, American Society of Civil Engineers, Atlanta, GA, USA,
449 2011.
- 450
- 451 LEITE, H.E.A.S. **Estudo do comportamento de aterros de RSU em um biorreator em**
452 **escala experimental na cidade de Campina Grande – Paraíba.** Dissertação (Mestrado em
453 Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande –
454 PB. 2008.
- 455
- 456 MCDOUGALL, J.R., PYRAH, I.C., YUEN, S.T.S., MONTEIRO, V.E.D., MELO, M.C.;
457 JUCA, J.F.T., **Decomposition and settlement in landfilled waste & other soil-like**
458 **materials.**Geotechnique 54, Vol 9, 605-610. 2004.
- 459
- 460 McDOUGALL J.R.; PHILP J.C. **Parametric Study of Landfill Biodegradation Modelling:**
461 **Methanogenesis & Initial Conditions.** In Proc. Sardinia. p. 79-88.8th Intl. Waste Man. &
462 Landfill Symp. Eds. Christensen TH, Cossu R; Stegmann R, CISA, Cagliari, v. 1. 2001.
- 463
- 464 MELO, M. C. **Uma análise de recalques associada abiodegradação no aterro de resíduos**
465 **sólidos da Muribeca.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de
466 Pernambuco. Recife,2003.
- 467
- 468 MELO, M. C. **Influência da Matéria Orgânica nos Recalques de Resíduos Sólidos**
469 **Urbanos Aterrados.** 148p. Tese (Tese de doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais),
470 Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina
471 Grande, 2011.
- 472
- 473 MOREDA, I.L. “**El Asentamiento en un Relleno Sanitario y su Relación com**
474 **la Biodegradación**”. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería sanitaria y Ambiental.
475 Porto Alegre, RS. 2000.
- 476
- 477 O'KEEFE, D.M. e CHYNOWETH, D.P. **Influence of phase separation, leachate recycle**
478 **and aeration on treatment of municipal solid waste in simulated landfill cells.**Bioresource
479 Technology, vol. 72, pp. 55-66, 2000.
- 480
- 481 PAIVA. W. **Aplicação da Estatística Para Descrever um Comportamento de um Solo**
482 **Expansivo.** Tese de Doutorado pela Universidade Federal de Pernambuco-UFPE Programa
483 de Pós-Graduação em Engenharia Civil em Geociências. Recife PE. 2009.
- 484
- 485 PALMISANO, A.C.; BARLAZ, M.A, **Microbiology of Solid Waste.**pp.1-224. In Anna C.
486 Palmisano, Morton A. Barlaz (eds). 1996.
- 487 REDDY.K. R. **Geotechnical Aspects of Bioreactor Landfills** IGC 2006. Chennai, INDIA.
488 2006.
- 489

- 490 Reddy. K.R. and Kulkarni, H.S. “**Modeling of Horizontal Trench Systems for Leachate**
491 **Recirculation in Bioreactor Landfills**”, in Proc. of the 25th International
492
493 Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, Pennsylvania: 643-
494 656, 2010.
495
- 496 RIBEIRO. L.S. **Estudo da Degradação dos Resíduos Sólidos Urbanos Através dos**
497 **Parâmetros Físicos e Físico- químicos em um Biorreator de Escala Experimental.**
498 Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental -Universidade Federal de
499 Campina Grande, Campina Grande-PB, 2012.
500
- 501 WHO.International Reference Center for Wastes Disposal.**Methods of analysis of sewage**
502 **sludge solid wastes and compost.**Switzerland.197

CONCLUSÃO GERAL

- A análise da ACP, utilizando dados dos parâmetros físico-químicos, microbiológicos e geotécnicos, identificou grupos de variáveis que influenciaram na biodegradação e no comportamento geral dos resíduos depositados na célula experimental;
- Pode-se verificar por meio da ACP, que os recalques na camada superior e inferior da célula experimental estudada, formaram grupos com tempo (dias), apresentando correlações positivas e fortes. Já na camada intermediária, os recalques formou grupo com pH, tendo correlação positiva com tempo. Isso mostra que, conforme o tempo passa, os recalques evoluem;
- Na camada superior houve uma correlação dos Sólidos Voláteis, Teor de Umidade e DBO, demonstrando a interligação entre eles. Na célula estudada evidenciou-se períodos de infiltração na camada superior, o que pode provocar a desestabilização da biodegradação na massa de resíduos, além do aumento de oxigênio dissolvido e umidade, com conseqüente, redução dos recalques;
- Constatou-se que as condições ambientais podem influenciar no comportamento geral da biodegradabilidade dos resíduos em aterros sanitário, pois, a camada superior da célula experimental obteve significativos coeficientes de variação dos parâmetros de Teor de Umidade, Sólidos Voláteis, DBO e DQO, acima de 30%, quando comparada às outras camadas de resíduos, indicando altas dispersões sendo, portanto, bastante influenciado pelo meio externo em relação às demais camadas;
- A avaliação dos recalques relacionados à biodegradação de resíduos sólidos urbanos depositados na célula experimental estudada pode dar um norteamento na gestão e gerenciamento de aterros em escala real, tanto em relação à redução de volume como

em sua deformabilidade, levando em consideração que a maior disponibilidade de matéria orgânica biodegradável resulta em maiores deformação no tempo;

- O estudo da caracterização dos resíduos através da composição gravimétrica e volumétrica desta célula experimental evidenciou a importância de conhecer os resíduos participantes do processo de degradação, considerando que, a partir desta relação possibilita-se à elaboração de estudos e projetos de aterros sanitários com condições meteorológicas locais semelhantes;
- As características físicas dos RSU da cidade de Campina Grande proporcionam grandes deformações na massa de resíduos devido ao elevado teor de matéria orgânica. Assim, projetos de aterros sanitários com resíduos semelhantes, devem apresentar sistema eficiente de líquidos e gases, além de propiciar um reaproveitamento de biogás como fonte de energia;
- Através deste estudo foi possível identificar a importância de utilizar ferramentas estatísticas, em especial a ACP, na compreensão dos resíduos estudos e como os recalques podem representar na estabilidade de aterros de resíduos, relacionado à degradação da matéria orgânica, fatores ambientais, geotécnico, previsão de vida útil de aterro e dimensionamento, aspectos sanitários e geotécnicos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABREU, R. C. **Compressibilidade de maciços sanitários**. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de São Paulo.

ABICHOU, T.; BARLAZ, M. A.; GREEN, R.; HATER, G. The Outer Loop bioreactor: A case study of settlement monitoring and solids decomposition. **International Journal of Integrated Waste Management**. Science and Technology. v.33, p. 2035-2047. 2013,

ABRELPE – Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012**. São Paulo: Abrelpe, 2012.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2013.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. UFPE. Recife. 2007.

AMASS, W.; AMASS, A.; TIGHE, B. A review of biodegradable polymers: uses, current developments in the synthesis and characterization of biodegradable polyesters, blends of biodegradable polymers and recent advances in biodegradation studies. **Polymer International**. v.47, n.2, 89-144. Mar.1998.

ANDRADE, E. M.; ARAÚJO, L. F. P.; ROSA, M.F.; GOMES, R. B.; LOBATO, F. A. O. Fatores determinantes da qualidade das águas superficiais na bacia do Alto Acaraú, Ceará, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.6, p.1791-1797, dez. 2007.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 10004: Resíduos Sólidos – classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

BABU, G. S. ;LAKSHMIKANTHAN, P. Estimation of the components of municipal solid waste settlement. **Waste Management & Research**, v. 33, p. 30–38. Feb. 2015.

- BAREITHER, Christopher A.; BENSON, Craig H.; EDIL, Tuncer B. Compression behavior of municipal solid waste: immediate compression. *Journal of Geotechnica and Geoenvironmental Engineering*, v. 138, p. 1047-1062. sep. 2012.
- BARLAZ, M. A.; SCHAEFER, D. M.; HAM, R. K. Bacterial Population Development and Chemical Characteristics of Refuse Decomposition in a Simulated Sanitary Landfill. **Applied and Environmental Microbiology**, London, v. 55, n.1, p.55-65, 1989.
- BARROSO, L. P.; ARTES, R. **Análise Multivariada**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2003.
- BERNARDES, M. S. Os desafios para efetivação da Política Nacional de Resíduos Sólidos frente a figura do consumidor-gerador. **Revista Eletrônica do Curso de Direito da UFSM**, Santa Maria, v.8, p. 195-207, abril 2013.
- BIDONE, F.R.A., POVINELLI, J. **Conceitos Básicos de Resíduos sólidos**, São Carlos, EESC-USP, ed. 1, v.1, 1999.
- BJARNGARD, A.; EDGERS, L (1990) Settlement of Municipal Solid Waste Landfills. Proceedings of the 13th Madison waste conference, University of Wisconsin-Madison, p. 1-9, nov. 2014.
- BÖHM K.; SMIDT, E; TINTNER, J. Application of various statistical methods to evaluate thermo-analytical data of mechanically–biologically treated municipal solid waste. **Thermochimica Acta**, v. 501, p. 91–97, jan. 2010.
- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. São Paulo, 2008. Oficina de textos.
- BLIGHT, G. Slope failures in municipal solid waste dumps and landfills: a review. *Waste Management and Research*, v. 26, n. 5,p. 448-463, 2008.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Portaria nº404, de 11 de novembro de 2008. Aprova o Regimento Interno do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União. 3 de ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 07 nov. 2010.

CAMPOS, J. R. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, p. 464, 1999.

CANDIANI, G. Estudo da geração de metano em uma célula de aterro sanitário. Tese de doutorado (Programa de Pós-graduação em Energia) - Universidade Federal do ABC. Santo André, São Paulo. 2011.

CARDIM, R. D. **Estudo da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de Cisalhamento direto de grandes dimensões**. Dissertação de Mestrado (Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

CARVALHO, M. N. **Estudo da biorremediação in situ para tratamento de solos e aquíferos contaminado com percolado de chorume**. Dissertação de mestrado (Faculdade de Tecnologia) - Universidade de Brasília, Brasília. 1997.

CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico dos resíduos sólidos**. São Carlos: EESC-USP, Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 306, 1999.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F. **Evaluation of the Relation Between Precipitation and Leachate Flow in an Experimental Sanitary Landfill**. XXXI Congreso Interamericano Aidis, Santiago - CHILE. Centro de Eventos Casa Piedra, Oct. de 2008.

CELERE, M.S.; OLIVEIRA, A.S.; TREVILATO, T.M.B.; SEGURA-MUÑOZ, S.I. Metais presentes no chorume coletado no aterro sanitário de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, e sua relevância para saúde pública. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v.23, n.4, abr. 2007.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares – 2009**. São Paulo: Cetesb, 2010. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/publicacoes.asp>>. Acessado em: 05 jan. 2015.

COMPARIN, Isadora. **Estudo do Comportamento de Resíduos Sólidos Urbanos em Lisímetro de Caráter Experimental**. 2008. Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2011.

COUMOULOS, D. G.; KORYALOS, T. P. Prediction of attenuation of landfill settlement rates with time. In: fourteenth international conference on soil mechanics and foundation engineering. Hamburg, 1997.

DENARDIN, G. P.. **Estudo de recalques do aterro sanitário da central de resíduos do Recreio – Minas do Leão/RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2013.

El-Fadel M, Findikakis AN, Leckie JO. Modelling Leachate Generation and Transport in Solid Waste Landfills. **Environ Technol.** p. 669-686, v. 18, 1997

EPA – Environment Protection Agency. **Climate Change and Waste**. Reducing Waste Can Make a Difference. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/pubs/ghg/climfold.pdf>>. Acesso em: 05 janeiro. 2015.

FERREIRA, M. A. S. **Aplicação de modelos de avaliação qualitativa e quantitativa dos percolados gerados em aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2006.

FUCALE, S. P. Resistência em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos. **I Seminário de Tese de Doutorado**, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Brasil. 2002.

GRISOLIA M.; NAPOLEONI Q.; TANCEDI G. The use of triaxial test for characterization of MSW. In: **Proceedings of Sardinia '95—5th international waste management and landfill symposium**, Cagliari, Italy, v. 2, p. 761–768. 1995.

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, v. 2, p. 642-646, nov 1996.

HIRSCH, A. K.; VERA, R. A.; BRIONES, M. E. Estudio a Escala de Laboratorio para la Determinación de los Parámetros Hidrológicos Óptimos para la Generación de Metano en Rellenos Sanitarios en Chile. Universidad Católica De Valparaíso. **Escuela de Ingeniería en Construcción**. 2002.

INPEV – Instituto Nacional de Processamento de Embalagens Vazias. Disponível em:<<http://www.inpev.org.br/>>. Acesso em: 05 jan. 2015.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Disponível em:<http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf/>. Acesso em: 05 mar. 2015.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. . **Estudos Avançados**. São Paulo, v.25, n.71, p. 135-158, 2011.

JUNQUEIRA, F. F. **Análise do Comportamento de Resíduos Urbanos e Sistemas Dreno Filtrantes em Diferentes Escalas, com Referência ao Aterro do Jockey Club-DF**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal. 2000.

KOERNER, R.M., SOONG, T.-Y., 2000. Leachate in landfills: the stability issues. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 18, 293–309.

KROEKER, E.J. “Anaerobic treatment process stability”. **Journal WPCF**, London, v. 51, n.4, p. 718. 1979.

LANDVA, A. O.; VALSANGKAR, A. J.; PELKEY, S. G. Lateral earth pressure at rest and compressibility of municipal solid waste. **Canadian Geotechnical Journal**. v. 37, p. 1157-1165. 2000.

LEITE, H. E. A. S. **Estudo do comportamento de aterros de RSU em um biorreator em escala experimental na cidade de Campina Grande – Paraíba**. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Campina Grande, Paraíba. 2008.

LI, Ying; LI, Jinhui; DENG, Chao. Occurrence, characteristics and leakage of polybrominated diphenyl ethers in leachate from municipal solid waste landfills in China. **Environmental Pollution**, v. 184, p. 94-100, January 2014.

LIMA, L. M. Q. Tratamento e Biorremediação. 3 ed. São Paulo: Hemus Livraria, 265p. 2004.

LOPES, L. F. D. **Análise de componentes principais aplicada à confiabilidade de sistemas complexos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos urbanos da Muribeca**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.

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

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; PARKER, J. Brock Biology of Microorganism. **Upper Saddle River**, NJ: Prentice Hall, ed. 10, p. 1088,, 2012.

MARQUES, A. C. M.; FILZ, G. M.; ASCE, M.; VILAR, O. M. Composite Compressibility Model for Municipal Solid Waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, p. 372-378, April 2003.

MARTINS, S. L. M.; GODOY, L. P.; LOPES, L. F. D. Monitoramento do controle estatístico do processo utilizando ferramentas estatísticas. **Espacios**, v. 33, n. 6, p. 16, fev. 2012.

MELO, M.C. **Uma Análise de Recalques Associada a Biodegradação no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca**. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife, Pernambuco, 2003.

MELO, M.C., **Estudo da matéria orgânica nos recalques de resíduos sólidos urbanos aterrados**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Campina Grande, Paraíba, 2011.

MELO, V.L.A., JUCÁ; J.F.T. Estudos de referência para diagnóstico ambiental em aterros de resíduos sólidos. **In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Porto Alegre. 2000.

MENDES P. M. R. **Recalque do Maciço dos Resíduos Sólidos no Aterro Sanitário do Cidade de Foz do Iguaçu – PR**. Trabalho de Conclusão de Curso. União Dinâmica de Faculdade Cataratas - Curso de Engenharia Ambiental. Foz do Iguaçu – PR. 2009.

MCDUGALL, J.R.; PYRAH, I.C., YUEN, S.T.S.; MONTEIRO, V.E.D.; MELO, M.C.; JUCA, J.F.T. Decomposition and settlement in landfilled waste & other soil-like materials. **Geotechnique**, n. 54, v. 9, p. 605-610. 2004.

MONTEIRO, V.E.D. **Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do aterro de resíduos sólidos da Muribeca**. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, 2003.

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

NASCIMENTO, J. C. F. **Comportamento Mecânico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2007.

NETO, G. G. **Estatística multivariada sobre dados categóricos: contribuições da regressão logística à análise de correspondência múltipla**. Curso (Especialização em Métodos Estatísticos Computacionais) - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2013.

NETO, J. M. M. **Estatística multivariada - Uma visão didática-metodológica. (2004)**
Disponível em:

<http://www.pucrs.br/famat/viali/especializa/realizadas/ceea/multivariada/textos/Moita_Neto.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2015.

NETO, J. M. V., BEZERRA, E. B. N.; MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D.
Estudo do comportamento de metais em um lisímetro de resíduos sólidos urbanos. **Revista Ciência e Tecnologia**. vol. 17, n.31, p. 54-66, dez. 2014.

NOORI, R.; ABDOLI, M.A.; AMERI, Ghasrodashti A.; JALILI Ghazizade M. Prediction of Municipal Solid Waste Generation with Combination of Support Vector Machine and Principal Component Analysis: A Case Study of Mashhad. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 28, n. 2, p. 249-258, July 2009.

OLIVIER, F.; GOURC, J. P. Hydro-mechanics of MSW subject to leachate recirculation in a large-scale compression reactor cell. **Waste Management Journal**, v. 27, n. 4, p. 44 - 58. 2007.

OUVRY, J.F. PAGE, B. Settlement of Waste Packaged in Chaffs in a Domestic Waste Disposal. **International Workshop “Hydro-Physico-Mechanics of Landfills”- LIRIGM**, Grenoble I University, France, v. , p. 21-22, mar. 2005.

PEREIRA, F. T. G. ; LEITE, H. E. A.; GARCEZ, L.R. ; ARAUJO, E. P. ; MELO, M. C. & MONTEIRO, V. E. D. Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina Grande-PB. In: **SINRES-2º Simpósio Nordestino de Resíduos Sólidos**. 2010.

POWRIE, W.; RICHARDS, D. J.; BEAVEN, R.P. Compression of waste and implications for practice. Proc. of Conference on Geotechnical Engineering of Landfills, London. 1998.

ROSA, D. S.; FILHO, R. P. Biodegradação: um ensaio com polímeros. Itatiba, Bragança Paulista/São Paulo: Moara Editora, Univ. São Francisco Editora, 2003.

ROSA, A. F. P. **Método para controle estatístico multivariado de processos em batelada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

REIS, E. Estatística Multivariada Aplicada. Lisboa: **Edições Sílabo, LDA**. ed. 2, p. 17-19. 2001.

SCHULER, A. R. **Análise do Comportamento de um Aterro Municipal de Resíduos Sólidos Urbanos Instrumentado**. Dissertação (Engenharia Civil, COPPE) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2010, 152p.

SIMÕES, G. F. **Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos**. Tese (Doutorado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2000.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A. A. Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil, **Waste Management**, v. 33 , p. 420-430, nov. 2012.

SIMÕES, G. F.; CARVALHO, S. N; ALMEIDA, L. L. Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos. **XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Campo Grande, 2005.

SISINO, C.L.S. Estudo Preliminar da Construção Ambiental em Área de Influência do Aterro Controlado do Morro do Céu – Niterói RJ. Dissertação (Mestrado) - FIOCRUZ. 1995.

SINDUSCON. Gestão ambiental de resíduos da construção civil. A experiência do SindusCon-SP. São Paulo: Sinduscon, 2005.

SOWERS, G. F., “Settlement of waste disposal fills”. In: **Proc. 8th International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering**, Moscou, Russia, v. 2, p. 207-210, 1973.

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**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil, UnB. Brasília. 2009.

TIGRE, P. B. Inovação e Teorias da Firma em Três Paradigmas, **Revista de Economia Contemporânea**, n.3, p. 67-111. 1998.

USEPA. **Landfill bioreactor performance, second interim report outer loop recycling & disposal facility louisville**, Kentucky, EPA/600/R-07/060. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. 2006.

VAN HAANDEL, A. C., LETINGA, G. **Tratamento Anaeróbio de Esgoto: Um Manual para Regiões de Clima Quente**. Campina Grande, Paraíba. 1994. 240p.

VAN MEERTEN, J. J., SELLMELJER, J. B., & PEREBOOM, D. Prediction of Landfill Settlement. **Paper presented at the Sardinia 95 - 5th International Landfill Symposium**, Cagliari, Italy. 1995.

VICINI, L. Análise multivariada da teoria à prática. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa no Departamento de Estatística) - Universidade Federal de Santa Maria, UFSM. Santa Maria, RS. 2005.

VULLO, D. L. Microorganismos y metales pesados: una interacción en beneficio del medio ambiente. **Revista Química Viva**. v. 2, n.3, p. 93-104. 2003.

WALL D. K.; ZEISS C. Municipal Landfill Biodegradation and Settlement. **ASCE Journal of Environmental Engineering**, v. 121, n.3, p. 214-223. 1995.

WARD R. S.; WILLIAMS G. M.; HILLS C. C. Changes in major and trace components of landfill gas during subsurface migration. **Waste Management Research**, v. 14, p. 243-261. 1996.

WARITH, M. A.; SHARMA, R. Technical review of methods to enhance biological degradation in sanitary landfills. **Water Quality Research Journal of Canada**. v. 33, ed.3, p. 417-437, 1998.

WILKS, Daniela S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. **Academic Press**, n. 3, p. 1-31, 2011.

APÊNDICES

Apêndice A – Matriz de correlação da camada superior

	Dias	Aerób.	Anaer.	pH	Teor de Um.	Sól. Voláteis	DBO	DQO	Fungos	Col. Term.	Clor.	Ác. Voláteis	Alcal.	Temp. I	Temp. Ambiente	Recalques	Precip.	Evap.
Dias	1,00	-0,97	0,07	0,69	-0,82	-0,86	-0,86	-0,52	0,28	-0,09	-0,85	-0,80	-0,79	-0,89	-0,93	0,99	0,48	-0,70
Aeróbios	-0,97	1,00	-0,12	-0,76	0,85	0,87	0,89	0,52	-0,04	0,32	0,72	0,88	0,87	0,76	0,82	-0,97	-0,33	0,73
Anaeróbios	0,07	-0,12	1,00	0,54	0,39	0,32	0,33	0,44	-0,50	-0,56	0,29	-0,49	-0,48	-0,20	-0,17	-0,05	0,45	-0,33
pH	0,69	-0,76	0,54	1,00	-0,35	-0,36	-0,42	-0,48	-0,27	-0,63	-0,26	-0,97	-0,97	-0,62	-0,69	0,65	0,57	-0,95
Teor de Um.	-0,82	0,85	0,39	-0,35	1,00	0,99	1,00	0,57	-0,21	0,04	0,77	0,51	0,52	0,51	0,59	-0,90	0,06	0,39
Sól. Voláteis	-0,86	0,87	0,32	-0,36	0,99	1,00	0,99	0,49	-0,26	-0,01	0,83	0,53	0,53	0,59	0,65	-0,92	-0,01	0,37
DBO	-0,86	0,89	0,33	-0,42	1,00	0,99	1,00	0,57	-0,20	0,07	0,79	0,57	0,58	0,57	0,64	-0,93	-0,01	0,44
DQO	-0,52	0,52	0,44	-0,48	0,57	0,49	0,57	1,00	-0,33	-0,01	0,48	0,44	0,44	0,43	0,53	-0,59	-0,30	0,70
Fungos	0,28	-0,04	-0,50	-0,27	-0,21	-0,26	-0,20	-0,33	1,00	0,91	-0,70	0,24	0,28	-0,52	-0,46	0,26	0,44	0,03
Col. Term.	-0,09	0,32	-0,56	-0,63	0,04	-0,01	0,07	-0,01	0,91	1,00	-0,43	0,61	0,64	-0,17	-0,08	-0,10	0,16	0,43
Cloretos	-0,85	0,72	0,29	-0,26	0,77	0,83	0,79	0,48	-0,70	-0,43	1,00	0,39	0,36	0,85	0,84	-0,85	-0,43	0,36
Ác. Voláteis	-0,80	0,88	-0,49	-0,97	0,51	0,53	0,57	0,44	0,24	0,61	0,39	1,00	1,00	0,67	0,75	-0,77	-0,50	0,90
Alcalinidade	-0,79	0,87	-0,48	-0,97	0,52	0,53	0,58	0,44	0,28	0,64	0,36	1,00	1,00	0,63	0,72	-0,76	-0,45	0,89
Temp. I	-0,89	0,76	-0,20	-0,62	0,51	0,59	0,57	0,43	-0,52	-0,17	0,85	0,67	0,63	1,00	0,99	-0,82	-0,81	0,68
Temp. Ambiente	-0,93	0,82	-0,17	-0,69	0,59	0,65	0,64	0,53	-0,46	-0,08	0,84	0,75	0,72	0,99	1,00	-0,87	-0,77	0,76
Recalques	0,99	-0,97	-0,05	0,65	-0,90	-0,92	-0,93	-0,59	0,26	-0,10	-0,85	-0,77	-0,76	-0,82	-0,87	1,00	0,36	-0,67
Precipitação	0,48	-0,33	0,45	0,57	0,06	-0,01	-0,01	-0,30	0,44	0,16	-0,43	-0,50	-0,45	-0,81	-0,77	0,36	1,00	-0,66
Evaporação	-0,70	0,73	-0,33	-0,95	0,39	0,37	0,44	0,70	0,03	0,43	0,36	0,90	0,89	0,68	0,76	-0,67	-0,66	1,00

Apêndice B – Matriz de correlação da camada intermediária

	Dias	Aerób	Anaer.	pH	Teor de Um.	Sól. Voláteis	DBO	DQO	Fungos	Col. Totais	Col. Term.	Clor.	Ác. Voláteis	Alcal.	Temp. I	Temp. Ambiente	Recalques	Precip.	Evap.
Dias	1,00	-0,69	0,34	0,82	0,56	-0,89	-0,93	-0,63	0,01	-0,27	-0,04	-0,32	-0,67	-0,04	-0,20	-0,03	0,70	0,44	-0,86
Aeróbios	-0,69	1,00	-0,32	-0,86	-0,50	0,80	0,48	0,23	-0,25	-0,22	-0,48	0,46	0,56	-0,06	0,62	0,47	-0,53	-0,35	0,55
Anaeróbios	0,34	-0,32	1,00	0,39	0,18	-0,42	-0,18	-0,11	0,44	0,30	-0,05	0,16	-0,26	0,51	-0,59	-0,51	0,53	0,87	-0,51
pH	0,82	-0,86	0,39	1,00	0,55	-0,85	-0,67	-0,48	0,17	0,02	0,09	-0,26	-0,76	-0,10	-0,30	-0,13	0,68	0,49	-0,80
Teor de Um.	0,56	-0,50	0,18	0,55	1,00	-0,52	-0,38	-0,08	0,04	0,31	0,21	-0,14	-0,27	0,50	-0,33	-0,32	0,60	0,05	-0,57
Sól. Voláteis	-0,89	0,80	-0,42	-0,85	-0,52	1,00	0,84	0,48	-0,15	0,03	-0,26	0,21	0,56	-0,09	0,30	0,10	-0,55	-0,51	0,66
DBO	-0,93	0,48	-0,18	-0,67	-0,38	0,84	1,00	0,73	0,15	0,48	0,15	0,19	0,55	0,20	-0,12	-0,27	-0,51	-0,36	0,71
DQO	-0,63	0,23	-0,11	-0,48	-0,08	0,48	0,73	1,00	0,00	0,82	0,39	0,41	0,21	0,34	-0,34	-0,39	-0,20	-0,14	0,58
Fungos	0,01	-0,25	0,44	0,17	0,04	-0,15	0,15	0,00	1,00	0,21	0,52	-0,42	0,20	0,47	-0,45	-0,34	-0,25	0,10	0,04
Col. Totais	-0,27	-0,22	0,30	0,02	0,31	0,03	0,48	0,82	0,21	1,00	0,50	0,35	-0,05	0,57	-0,64	-0,63	0,18	0,21	0,17
Col. Term.	-0,04	-0,48	-0,05	0,09	0,21	-0,26	0,15	0,39	0,52	0,50	1,00	-0,40	0,26	0,43	-0,55	-0,46	-0,30	-0,23	0,36
Cloretos	-0,32	0,46	0,16	-0,26	-0,14	0,21	0,19	0,41	-0,42	0,35	-0,40	1,00	-0,10	0,03	0,29	0,26	0,11	0,38	0,16
Ác. Voláteis	-0,67	0,56	-0,26	-0,76	-0,27	0,56	0,55	0,21	0,20	-0,05	0,26	-0,10	1,00	0,40	0,15	-0,02	-0,76	-0,57	0,74
Alcalinidade	-0,04	-0,06	0,51	-0,10	0,50	-0,09	0,20	0,34	0,47	0,57	0,43	0,03	0,40	1,00	-0,59	-0,63	0,09	0,14	0,02
Temp. I	-0,20	0,62	-0,59	-0,30	-0,33	0,30	-0,12	-0,34	-0,45	-0,64	-0,55	0,29	0,15	-0,59	1,00	0,96	-0,40	-0,38	0,23
Temp. Ambiente	-0,03	0,47	-0,51	-0,13	-0,32	0,10	-0,27	-0,39	-0,34	-0,63	-0,46	0,26	-0,02	-0,63	0,96	1,00	-0,36	-0,26	0,14
Recalques	0,70	-0,53	0,53	0,68	0,60	-0,55	-0,51	-0,20	-0,25	0,18	-0,30	0,11	-0,76	0,09	-0,40	-0,36	1,00	0,65	-0,89
Precipitação	0,44	-0,35	0,87	0,49	0,05	-0,51	-0,36	-0,14	0,10	0,21	-0,23	0,38	-0,57	0,14	-0,38	-0,26	0,65	1,00	-0,57
Evaporação	-0,86	0,55	-0,51	-0,80	-0,57	0,66	0,71	0,58	0,04	0,17	0,36	0,16	0,74	0,02	0,23	0,14	-0,89	-0,57	1,00

Apêndice C – Matriz de correlação da camada inferior

	Dias	Aerob	Anaer	pH	Teor de Um.	Sól. Voláteis	DBO	DQO	Fungos	Col. Totais	Col. Term.	Cloretos	Ác. Voláteis	Alcal.	Temp. III	Temp. Ambiente	Recalques	Precip.	Evap.
Dias	1,00	-0,26	0,66	0,12	0,26	0,39	-0,49	0,00	-0,47	-0,47	-0,33	0,40	-0,60	0,31	0,11	-0,03	0,96	0,44	-0,86
Aeróbios	-0,26	1,00	0,15	0,36	0,18	0,19	0,67	0,61	-0,15	-0,08	-0,55	-0,26	0,36	-0,41	0,31	0,39	-0,11	0,20	0,05
Anaeróbios	0,66	0,15	1,00	-0,20	0,25	0,66	0,06	0,47	-0,27	-0,44	-0,30	0,42	-0,21	-0,08	0,57	0,54	0,71	0,41	-0,43
pH	0,12	0,36	-0,20	1,00	-0,31	0,34	-0,27	-0,04	-0,64	0,36	-0,16	0,00	-0,52	-0,01	-0,55	-0,48	0,04	0,30	-0,46
Teor de Um.	0,26	0,18	0,25	-0,31	1,00	-0,29	0,40	0,36	0,33	-0,61	-0,32	-0,18	0,46	-0,15	0,53	0,36	0,38	0,22	-0,22
Sól. Voláteis	0,39	0,19	0,66	0,34	-0,29	1,00	-0,05	0,29	-0,54	0,29	0,05	0,65	-0,49	-0,04	0,03	0,14	0,33	0,32	-0,31
DBO	-0,49	0,67	0,06	-0,27	0,40	-0,05	1,00	0,61	0,50	0,05	-0,22	-0,20	0,87	-0,20	0,53	0,59	-0,31	-0,28	0,57
DQO	0,00	0,61	0,47	-0,04	0,36	0,29	0,61	1,00	0,30	-0,10	-0,29	-0,18	0,40	-0,16	0,29	0,33	0,04	0,36	0,13
Fungos	-0,47	-0,15	-0,27	-0,64	0,33	-0,54	0,50	0,30	1,00	0,08	0,33	-0,49	0,75	-0,01	0,22	0,22	-0,44	-0,47	0,71
Col. Totais	-0,47	-0,08	-0,44	0,36	-0,61	0,29	0,05	-0,10	0,08	1,00	0,61	0,16	-0,08	0,13	-0,55	-0,36	-0,60	-0,40	0,46
Col. Term.	-0,33	-0,55	-0,30	-0,16	-0,32	0,05	-0,22	-0,29	0,33	0,61	1,00	0,02	-0,15	-0,25	-0,25	-0,13	-0,48	-0,31	0,36
Cloretos	0,40	-0,26	0,42	0,00	-0,18	0,65	-0,20	-0,18	-0,49	0,16	0,02	1,00	-0,36	0,43	-0,12	-0,14	0,34	0,21	-0,23
Ác. Voláteis	-0,60	0,36	-0,21	-0,52	0,46	-0,49	0,87	0,40	0,75	-0,08	-0,15	-0,36	1,00	-0,06	0,41	0,40	-0,44	-0,36	0,71
Alcalinidade	0,31	-0,41	-0,08	-0,01	-0,15	-0,04	-0,20	-0,16	-0,01	0,13	-0,25	0,43	-0,06	1,00	-0,41	-0,51	0,25	-0,15	-0,03
Temp. III	0,11	0,31	0,57	-0,55	0,53	0,03	0,53	0,29	0,22	-0,55	-0,25	-0,12	0,41	-0,41	1,00	0,97	0,33	-0,19	0,02
Temp. Ambiente	-0,03	0,39	0,54	-0,48	0,36	0,14	0,59	0,33	0,22	-0,36	-0,13	-0,14	0,40	-0,51	0,97	1,00	0,17	-0,26	0,14
Recalques	0,96	-0,11	0,71	0,04	0,38	0,33	-0,31	0,04	-0,44	-0,60	-0,48	0,34	-0,44	0,25	0,33	0,17	1,00	0,35	-0,83
Precipitação	0,44	0,20	0,41	0,30	0,22	0,32	-0,28	0,36	-0,47	-0,40	-0,31	0,21	-0,36	-0,15	-0,19	-0,26	0,35	1,00	-0,57
Evaporação	-0,86	0,05	-0,43	-0,46	-0,22	-0,31	0,57	0,13	0,71	0,46	0,36	-0,23	0,71	-0,03	0,02	0,14	-0,83	-0,57	1,00