



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL - PPGECA

**ESTUDO DOS RECALQUES EM ATERROS DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL E
ESTATÍSTICA**

RALINY MOTA DE SOUZA FARIAS

Campina Grande
Fevereiro de 2014

RALINY MOTA DE SOUZA FARIAS

**ESTUDO DOS RECALQUES EM ATERROS DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL E
ESTATÍSTICA**

Dissertação apresentada ao programa de pós graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, como exigência a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientadora: Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Coorientador: Prof. Dr. William de Paiva

CAMPINA GRANDE - PB

2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

F224e Farias, Raliny Mota de Souza.
Estudo dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos : uma abordagem experimental e estatística / Raliny Mota de Souza Farias. – Campina Grande, 2014.
128 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2014.

"Orientação: Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, Prof. Dr. William de Paiva".

Referências.

1. Resíduos Sólidos Urbanos. 2. Recalque. 3. Aterro Sanitário. 4. Modelos de Recalques. I. Monteiro, Veruschka Escarião Dessoles. II. Paiva, William de. III. Título.

CDU 628.312.1(043)

**ESTUDO DOS RECALQUES EM ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS:
UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL E ESTATÍSTICA**

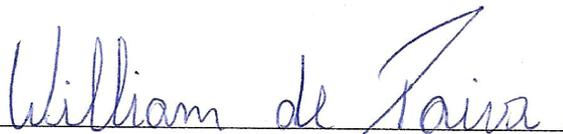
RALINY MOTA DE SOUZA FARIAS

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, COMO EXIGÊNCIA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Examinada por:



Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro
(Orientadora – Universidade Federal de Campina Grande)



Prof. Dr. William de Paiva
(Coorientador – Universidade Estadual da Paraíba)



Prof. Dr. Adriano Elísio de Lucena
(Examinador Interno – Universidade Federal de Campina Grande)



Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo
(Examinador Externo – Universidade Federal de Campina Grande – *Campus Cuité*)



Profa. Dra. Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk
(Examinador Externo – EcoSolutions Consultoria - Rio de Janeiro)

CAMPINA GRANDE

2014

Dedicatória

*Dedico este trabalho à minha mãe, **Joselma**, que me apoiou em todas as decisões, investindo no meu futuro e me ensinando, desde a infância, que o conhecimento é a maior virtude de um ser humano.*

À ela, todo meu amor, respeito e admiração.

AGRADECIMENTOS

A Deus Pai todo poderoso, pela sua infinita bondade ao me contemplar com o dom da vida, me mantendo forte, consciente, saudável e sempre fiel na fé, sem a qual, não conseguiria chegar onde cheguei.

A minha mãe, Joselma Mota, que é minha fortaleza e fonte de inspiração em todos os momentos, pela sua paciência ao lidar com minhas preocupações, pela dedicação inesgotável e pelo infinito amor, que com toda certeza é recíproco.

Ao meu irmão, Ramon Mota, que sempre foi motivo do meu orgulho e admiração, pelos seus sábios conselhos e pelo apoio em todas as horas.

Ao meu avô, Júlio (*in memoriam*), tios(as) e primas, por me acolherem em suas casas e em suas vidas sempre que eu precisei de um lugar para repousar, nunca deixando de torcer pelas minhas vitórias. Assim como meu querido Pai, José Renildes, que sempre me amou e acreditou na minha capacidade.

A Heliene, Camylla, Danielle, Raiane, Marina, Isabela (cunhada) e principalmente minha abençoada mãe, pela ajuda, incentivo e força dada nos últimos e decisivos meses, não permitindo que o desespero, a ansiedade e a baixa estima, abalassem os meus propósitos. A amizade de vocês é para mim um verdadeiro tesouro.

A minha orientadora, Veruschka, pelos ensinamentos, que por muitas vezes, atravessaram o campo acadêmico e tornaram-se aprendizados para toda a vida. Agradeço ainda, pela amizade construída, pela confiança adquirida e pela convivência, que foi sempre muito prazerosa.

Ao meu coorientador, William, por ser um exemplo de dedicação ao trabalho e respeito ao próximo, e pelo acompanhamento de todos os passos da minha pesquisa, tornando possível a realização desta dissertação.

A todos os integrantes e amigos do Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA), antigos e novos, que contribuíram intensamente para a ampliação dos meus conhecimentos, e avanço de toda a

pesquisa. Em especial a João, Elaine, Libânia, Alessandra e Márcio que colaboraram para a minha formação, desde as atividades realizadas em laboratório até a elaboração de projetos e artigos.

Aos colegas Pablo, Pedro e Rômulo, que além de me acompanharem nas medições *in situ*, sempre contribuíram com observações extremamente pertinentes aos estudos realizados.

Aos professores e funcionários pertencentes ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), que complementaram meus estudos e são dignos de todo o meu respeito.

A todos que fazem parte do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), que além de proporcionarem um excelente local de trabalho, ajudaram a pesquisa sempre que solicitados.

As MELHORES amigas e engenheiras, Renata e Bárbara, com quem sempre pude contar tanto no campo profissional e acadêmico, como no pessoal.

Aos amigos de Campina Grande/PB e João Pessoa/PB, por terem escutado os meus lamentos de cansaço, e por terem perdoado as minhas ausências, sempre que os estudos precisaram ser intensificados.

A família EAC-Catedral, que nesses dois anos, foi minha grande fonte de energia, me ajudando a renovar as forças, restaurar a fé e resgatar valores, que tendem a escapar quando o tempo é corrido. Meus verdadeiros anjos.

A CAPES, por financiar minha bolsa, sem a qual seria impossível dar continuidade aos meus estudos e me manter em Campina Grande.

A Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), por proporcionar uma ótima estrutura e possibilitar o desenvolvimento da pesquisa, através do campo experimental.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para conclusão do meu mestrado, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A análise do comportamento dos Resíduos Sólidos Urbanos exige a realização de estudos de alta complexidade, devido a heterogeneidade dos resíduos. Tornando de extrema relevância o desenvolvimento de estudos em células experimentais, que simulem as mesmas condições a que é submetido um aterro sanitário em escala real. Estes estudos podem contribuir para análise ou entendimento do comportamento mecânico e biológico dos resíduos, fornecendo subsídios para a previsão da vida útil e elaboração de projetos de aterro sanitário. O recalque corresponde a um dos parâmetros que melhor expressa o comportamento dos resíduos ao longo do tempo. Em aterros sanitários, qualquer modificação de ordem natural ou mecânica reflete na ocorrência dos recalques, causando redução do volume de resíduos através da expulsão de líquidos percolantes e gases gerados pela degradação. Muitos são os fatores envolvidos neste processo, e prever os recalques a partir de modelos teóricos, além de favorecer a operacionalidade dos aterros, pode evitar catástrofes ambientais. Diante desta problemática, o objetivo do trabalho foi analisar o comportamento dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos, através de estudos experimentais e estatísticos, para verificar o ajuste dos dados a modelos de previsão teóricos. A metodologia compreendeu varias etapas de execução, desde a construção da célula experimental, estudos geotécnicos, caracterização e monitoramento dos resíduos, medições *in situ* de recalques superficiais e em profundidade, e ajuste dos dados experimentais a modelos de recalque teóricos, através dos métodos iterativos de Gauss-Newton, para funções não lineares. Após a realização dos estudos, observou-se que as características físicas, geomecânicas e biológicas dos resíduos de Campina Grande/PB ofereceram grande influência na obtenção do recalque total de 0,77 m, ou seja, em dois anos de monitoramento, o aterro em escala experimental deformou-se aproximadamente 25% da massa em relação a sua altura inicial. Os ajustes definidos pela pesquisa demonstraram, para 95% de confiança, que o comportamento dos resíduos estudados apresentam semelhança aceitável com todos os modelos de recalque teóricos testados. Logo, os modelos ajustados além de poderem determinar a capacidade volumétrica do aterro e o seu tempo de vida útil, são capazes de dimensionar e/ou projetar aterros em diversas escalas, tanto para a cidade de Campina Grande/PB como para aterros de qualquer outra localidade com resíduos de características semelhantes.

Palavras Chaves: recalque, aterro sanitário, resíduos sólidos urbanos, modelos de recalque

ABSTRACT

The analysis of the behavior of Municipal Solid Waste requires the completion of studies of high complexity because of the heterogeneity of the waste. Becoming extremely important to develop studies in experimental cells, simulating the same conditions a full-scale landfill is subjected to. These studies can help to analyze and understand the mechanical and biological waste behavior, supporting the prediction of lifetime and drafting of landfill. The settlement corresponds to a parameter that best expresses the behavior of the waste over time. In landfills, any modification of mechanical or natural order reflects the occurrence of settlements, causing a reduction in the volume of waste by expulsion of percolating liquids and gases generated by degradation. Many factors are involved in this process and forecasting settlement using theoretical models, besides facilitating the landfill operation, can avoid environmental disasters. In front of this problem, the objective of this study was to analyze the behavior of settlements in municipal solid waste landfills, through experimental and statistical studies, to check the fitness of the data to theoretical prediction models. The methodology comprised several stages of execution, as the construction of the experimental cell, geotechnical studies, characterization and monitoring of waste, measurements *in situ* of surface settlements and in depth, and fitness of the experimental data to theoretical models of repression, through interactive methods Gauss-Newton, to non-linear functions. After the studies, it was observed that the physical, geo-mechanical and biological characteristics of the municipal solid waste of Campina Grande/PB offered great influence in obtaining the total discharge of 0.77m, that is in two years of monitoring, the landfill experimental scale deformed approximately 25% of the mass in relation to its initial height. The settings defined by the survey showed, for 95% confidence, that the behavior of residues studied has acceptable similarity to all tested theoretical models of repression. Therefore, the adjusted models can determine the volumetric capacity of the landfill and its useful lifetime, besides they are also able to scale and/or design landfills at various scales, for the city of Campina Grande/PB as for landfill at any other location with similar characteristics waste.

Key-words: settlement, landfill, municipal solid waste, settlement models

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas granulométricas de resíduos dos Lisímetros 1 e 2.....	30
Figura 2 - Curvas de variação da massa específica aparente seca em função da umidade do resíduos referente ao ensaio de compactação Proctor Normal.....	32
Figura 3 - Comportamento dos RSU ao longo do tempo.....	34
Figura 4 - Destinação final dos RSU Coletados no Brasil.....	37
Figura 5 - Destinação Final de RSU no Estado da Paraíba (t/dia).....	38
Figura 6 - Desenho esquemático do recalque em uma Célula de RSU (linha pontilhada).....	39
Figura 7 - Desenho esquemático de uma célula experimental de RSU, que simula condições de aterro sanitário.....	42
Figura 8 - Fluxograma das etapas executadas na pesquisa.....	58
Figura 9 - Detalhes construtivos da célula experimental em alvenaria de tijolos manuais.....	59
Figura 10 - A: Célula experimental com formato cilíndrico de 3,5 m de altura; B: Vista interna da Célula em estudo; C: Destaque de um dos pontos de coleta de RSU.....	60
Figura 11 - Desenho esquemático da Célula Experimental.....	61
Figura 12 - Destaque dos bairros incluídos na rota de coleta para amostragem de RSU.....	64
Figura 13 - A= Equipe de pesquisa pesando o resíduos coletados nos bairros; B= Resíduos sendo descarregados nas dependências da UFCG, setor C.....	65
Figura 14 - A= Descarregamento dos RSU; B= Abertura de sacolas; C= Homogeneização; D=Quarteamento e descarte de pilhas; E= encaminhamento para composição e caracterização dos resíduos e F= pesagem para enchimento.....	66
Figura 15 - A= Execução das camadas impermeabilizantes com umidade ótima; B= Camada de base da Célula experimental e C= Compactação da camada de cobertura.....	67

Figura 16 - A= Homogeneização dos RSU; B = Pesagem dos resíduos a serem acondicionados; C = RSU levado até a borda da Célula Experimental; D = Acomodação e compactação dos resíduos.	69
Figura 17 - A= Locais de retiradas da amostra; B= Resíduos para composição e C=Pesagem do material.	70
Figura 18 - A = Triagem dos Resíduos; B = Separação subclasses e C = Pesagem para gravimetria.....	71
Figura 19 - A= Medição de altura e diâmetro ocupado pelos resíduos; B= Pesagem do soquete e C= Aplicação do carregamento.	72
Figura 20 - A= Secagem dos resíduos ao ar; B = Quarteamento e descarte de duas pilhas de resíduos; C= Homogeneização manual das duas pilhas restantes e D= Pesagem de 10Kg de amostra para ser levada ao laboratório.	73
Figura 21 - A= Peneira Circular #76,2 mm; B= Série de peneiras retangulares; C= Resíduos submetidos ao peneiramento; D= Peneiramento sob agitação mecânica e E= Resíduos encaminhados para a estufa.	74
Figura 22 - A= amostra passante na peneira #19,1mm; B=Série de peneiras circulares; C=Peneiramento da fração fina e D= Capsula	75
Figura 23 - A= Amostras passantes na peneira #19mm; B= Acréscimo da porcentagem adequada de água; C= Golpes da compactação; D= Pesagem do cilindro compactado; E=Desmolde de um do pontos do ensaio e F= pesagem para obter a umidade.....	77
Figura 24 - A= Pesagem das cápsulas com resíduos e B= Resíduos encaminhados para estufa.	79
Figura 25 - A= Placas de recalque superficial; B= Corda utilizada para nível de referência; C=Trena utilizada na medição; D= Corda de referência fixada nas bordas da Célula Experimental e E= Aferição dos deslocamentos verticais das placas.	80

Figura 26 - A= Placa de recalque em profundidade; B= Mangueira graduada com sensor na ponta; C= Ohmímetro; D=Inserção do sensor magnético no tubo PVC e E=Identificação da profundidade da placa.....	81
Figura 27 - Composição Gravimétrica dos resíduos de Campina Grande/PB.	84
Figura 28 - Composição volumétrica dos RSU de Campina Grande/PB.	86
Figura 29 - Composição dos volumes de RSU compactados estaticamente.	87
Figura 30 - Curva Granulométrica dos RSU que compõem a Célula Experimental.....	88
Figura 31 - Curva de compactação característica dos RSU.....	90
Figura 32 - Evolução da umidade no interior da Célula Experimental de RSU.....	93
Figura 33 - Recalques dos RSU no interior da Célula Experimental.	95
Figura 34 - Velocidades dos recalques ao longo do tempo.	97
Figura 35 - Deformação específica da massa de resíduos em função do tempo.	99
Figura 36 - Curva de ajuste gerada para o teste do modelo de Sowers (1973).	101
Figura 37 - Curva de ajuste gerada para o teste do modelo de Yen & Scalon (1975).....	103
Figura 38 - Curva de ajuste gerada para o teste do modelo de Ling <i>et. al.</i> (1998).....	105
Figura 39 - Curva de ajuste gerada para o teste do modelo de Simões (1973).	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Gravimétrica e Volumétrica de Campina Grande/PB.....	26
Tabela 2 - Peso específico solto e compactado dos RSU de Campina Grande/PB.....	29
Tabela 3 - Quantidade de RSU coletado nos bairros contemplados com o plano estatístico..	63
Tabela 4 - Massa específica dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campina Grande/PB.....	91
Tabela 5 - Parâmetros obtidos no ajuste dos dados ao modelo de Sowers (1973).....	101
Tabela 6 - Parâmetro obtidos no ajuste dos dados ao modelo de Yen & Scalon (1975).....	102
Tabela 7 - Parâmetro obtidos no ajuste dos dados ao modelo de Ling <i>et. al.</i> (1998).....	104
Tabela 8 - Parâmetro obtidos no ajuste dos dados ao modelo de Simões (2000).....	106
Tabela 9 - Resultado dos testes realizados para quatro modelos de previsão dos recalques..	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação Morfológica dos RSU.	24
Quadro 2 - Hipóteses básicas da teoria clássica de Terzagui aplicada a solos e a RSU.....	35
Quadro 3 - Recalque em maciços sanitários.....	41
Quadro 4 - Alguns aspectos do uso de modelos Não lineares comparados a modelos lineares.	52
Quadro 5 - Instrumentação utilizada para operação e monitoramento da Célula Experimental.	62
Quadro 6 - Ensaios Geotécnicos e suas respectivas normas de referência.....	68
Quadro 7 - Massa específica e teor de umidade obtidos em laboratório e <i>in situ</i>	89

LISTA DE SÍMBOLOS, SOGLAS E ABREVIACÕES

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

AIC - Critério de informação de Akaike

$C\alpha$ - Queda de tensão versus curva de log-tempo ou o índice de compressão secundária

CBR - Índice de Suporte Califórnia (California Bearing Ratio)

C_R - Coeficiente de compressão

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

DGGT - Sociedade Geotécnica alemã (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik)

DLU - Diretoria de Limpeza Urbana

ΔH_1 - recalque da camada de espessura inicial H_0

ΔH_2 = recalque da camada de espessura inicial H_0 devido ao comportamento viscoso do material

$\Delta H_{\text{biodegradação}}$ - recalque devido à biodegradação dos resíduos

$\Delta H_{\text{carregamento}}$ - recalque devido à parcela mecânica

$\Delta H_{\text{comportamento viscoso}}$ - recalque devido ao comportamento viscoso dos resíduos

ΔH_{Total} - recalque total

ΔP - acréscimo de tensão total vertical

ε_i - Erros da função não linear.

GC - Grau de Compactação

GGA - Grupo de Geotecnia Ambiental

γ - Vetor de parâmetros do modelo

γ_d^{campo} - Massa específica do campo (lisímetro)

$\gamma_d^{\text{máximo}}$ - Massa específica seca máxima (laboratório)

$H(t_c)$ - altura de resíduos após o recalque primário

IBAM - Instituto Brasileiro de Administração Municipal

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia Estatística

ISSMFE - International Society for Soil Mechanics and Foundating Engineering

K - Número de parcelas do modelo, inclusive o intercepto

k_{ij} - taxa de biodegradação da fração constituinte i na camada j

LN - Logaritmo na base Neperiana

m e n - constantes empíricas

M_{ij0} - massa inicial potencialmente biodegradável da fração constituinte i na camada j .

MR - Massa retida

MTS - Massa total seca

MTSPF - Massa total seca da parte fina;

NBR - Normas Brasileiras

n - Número de variáveis (observações)

N - Fração que a massa fina representa do total da amostra

ρ - massa específica aparente solta (kg/m^3)

ρ_0 - taxa ou velocidade inicial de recalques

ρ_{comp} - Massa específica compactada em ton/m^3

ρ_s - Massa específica Solta em ton/m^3

P_0 - tensão total vertical inicial

P_f - peso final (g)

P_i - peso inicial (g)

PMCG - Prefeitura Municipal de Campina Grande

PNRS - Política Nacional dos Resíduos Sólidos

PP - Porcentagem que passa no peneiramento grosso

PR - Porcentagem retida no peneiramento grosso

p-value - nível descritivo

PVC - Cloreto de polivinila

r - Coeficiente de correlação

R^2 - Coeficiente de determinação

REMCOM - Réseau Européen de Mesures Pour la Caractérisation des Ordures Ménagère

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

S - recalque

S_0 - recalque inicial

S_i - recalque no instante considerado

$S(t)$ - recalque secundário

S_{ult} - recalque final

SQR - Soma dos quadrados dos resíduos

t - tempo decorrido

t_0 - tempo inicial

t_1 - tempo para o recalque secundário iniciar

UFMG - Universidade Federal de Campina Grande

v - taxa ou velocidade de recalque

V - Volume do recipiente (m^3)

w - Teor de Umidade (%)

X_E - Variáveis estimadas

X_i - Variável independente da função não linear

X_O - Variáveis observadas

\bar{X} - Média das variáveis

Y_i - Variável dependente da função não linear.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	19
1.1.	OBJETIVOS	21
1.1.1.	Objetivo Geral	21
1.1.2.	Objetivos Específicos	21
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1.	ASPECTOS GEOTÉCNICOS	22
2.1.1.	Geotecnia Clássica	22
2.1.2.	Geomecânica dos Resíduos Sólidos Urbanos	23
2.1.2.1.	Composição Gravimétrica e Volumétrica	24
2.1.2.2.	Teor de umidade	27
2.1.2.3.	Peso específico dos RSU	28
2.1.2.4.	Distribuição granulométrica	29
2.1.2.5.	Compactação dos RSU	31
2.1.2.6.	Compressibilidade e Recalques	33
2.2.	COMPORTAMENTO DOS RECALQUE EM ATERROS DE RSU	36
2.2.1.	Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos	36
2.2.2.	Recalque em aterros	39
2.2.3.	Estudos de recalques em escala experimental	41
2.3.	MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES	43
2.3.1.	Modelo clássico de Sowers (1973)	45
2.3.2.	Modelo logaritmo de Yen & Scalon (1975)	46
2.3.3.	Modelo hiperbólico de Ling et al. (1998)	46
2.3.4.	Modelo de Simões (2000)	47
2.3.5.	Outros modelos de recalque	49

2.4.	ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DOS MODELOS DE RECALQUE	51
2.4.1.	Métodos iterativos de Gauss-Newton	53
2.4.2.	Teste dos modelos	54
2.4.2.1.	Coefficiente de determinação - R^2	55
2.4.2.2.	Soma de Quadrados dos Resíduos (SQR)	56
2.4.2.3.	Crítério de AKAIKE -AIC	57
3.	METODOLOGIA	58
3.1	CÉLULA EXPERIMENTAL DE RSU	59
3.1.1	Construção	59
3.1.2	Instrumentação	61
3.2	AMOSTRAGEM DOS RESÍDUOS	63
3.2.1	Plano estatístico	63
3.2.2	Rota de coleta	64
3.2.3	Preparação da amostra de RSU	65
3.3	CAMADAS IMPERMEABILIZANTES	67
3.4	PREENCHIMENTO DA CÉLULA EXPERIMENTAL DE RSU	68
3.5	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS RESÍDUOS	70
3.5.1	Composição Gravimétrica e Volumétrica	70
3.5.2	Granulometria dos RSU	72
3.5.3	Compactação dos resíduos aterrados	76
3.5.4	Massa Específica e Umidade dos Resíduos	78
3.6	MONITORAMENTO DOS RECALQUES IN SITU	79
3.6.1	Medições de recalque superficial	80
3.6.2	Medições de recalque em profundidade	81
3.7	AJUSTE DOS MODELOS DE RECALQUE A PARTIR DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS COLETADOS	82

3.7.1	Teste dos modelos pelo método iterativo de Gauss-Newton	82
3.7.2	Coefficiente de determinação (R^2), Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR) e Critério de Akaike (AIC)	83
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	84
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS RESÍDUOS	84
4.1.1	Composição Gravimétrica e Volumétrica	84
4.1.2	Granulometria dos RSU	87
4.1.3	Compactação dos resíduos aterrados	89
4.1.4	Massa específica dos RSU	91
4.1.5	Umidade dos Resíduos ao longo do tempo	93
4.2	RECALQUES IN SITU	94
4.2.1	Recalque ao longo do tempo	94
4.2.2	Velocidade dos recalques	97
4.2.1	Deformação específica em função do tempo	98
4.3	AJUSTES DOS DADOS AOS MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES	100
4.3.1	Testes para o modelo de Sowers (1973)	100
4.3.2	Testes para o modelo de Yen e Scalon (1975)	102
4.3.3	Teste para o modelo de Ling et al. (1998)	104
4.3.4	Teste para o modelo de Simões (2000)	106
4.3.5	Análises de R^2 , SQR e AIC	108
5.	CONCLUSÕES	110
6.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	113
7.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	114

ESTUDO DOS RECALQUES EM ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL E ESTATÍSTICA

1. INTRODUÇÃO

Entender o que acontece no interior dos aterros sanitários exige a realização de estudos de alta complexidade devido a heterogeneidade dos resíduos. Um dos fenômenos que melhor expressam o comportamento de aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) ao longo do tempo é o recalque, termo geotécnico que representa a deformação vertical devido à ação das tensões e redução dos vazios.

Quando este conceito é transferido para a geotecnia ambiental é possível entender que os recalques em aterros sanitários correspondem a redução do volume de resíduos através da expulsão descendente de líquidos percolantes e ascendente de gases gerados pela degradação. A diferença entre os dois conceitos é que para a geotecnia clássica, a redução do volume é resultante da acomodação das partículas sólidas após a diminuição dos vazios, e na geotecnia ambiental, além dessa acomodação a redução também é dada pela perda da massa através da degradação e constante transformação dos resíduos em líquidos e gases.

Os recalques em aterros sanitários são resultantes do somatório dos carregamentos ocorridos, tais como peso próprio dos resíduos, das camadas impermeabilizantes e dos maquinários essenciais ao funcionamento e operação do aterro, agregado a degradação incidida nos resíduos.

O recalque é um importante componente do funcionamento dos aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), devendo ser considerado como elemento fundamental ao seu dimensionamento, pois as deformações verticais não só repercutem nos aspectos estruturais da obra, como também no que diz respeito ao aproveitamento do volume, podendo gerar instabilidade do maciço e até deslizamentos.

Na massa de resíduos, elementos sólidos variam naturalmente em forma e tamanho, devido a capacidade de deformação e de seus processos degradativos. Segundo Batista *et. al.* (2013) a importância de conhecer o recalque e sua velocidade em aterros sanitários está na determinação da capacidade volumétrica do aterro, para assim poder analisar recalques diferenciais que provocam rupturas nos sistemas de cobertura, entre outras falhas.

Compreender a abrangência dos recalques em aterros sanitários não é uma tarefa fácil, mas pode ser simplificada com o desenvolvimento de estudos em células experimentais que

simulem as mesmas condições de monitoramento e controle a que é submetido um aterro sanitário em escala real, cujo funcionamento não favorece a obtenção de dados *in situ*, uma vez que alguns estudos podem dificultar ou alterar a operacionalidade do sistema. Em Campina Grande/PB estudos de recalque em células experimentais foram realizados por Leite (2008), Melo (2011), Batista (2012) e Caribé *et al.* (2013), que afirmaram a relevância de monitorar o momento no qual os recalques cessarão, para que os diversos fatores envolvidos no processo, além de evitar possíveis catástrofes ambientais, favoreçam a estimativa da vida útil do aterro.

Outra finalidade de se estudar recalques em aterros, é entender o processo de decomposição dos resíduos ao longo do tempo e em profundidade, baseado na velocidade desses recalques medidos ou estimados através de modelos de previsão (MELO, 2011).

Vários são os modelos já existentes para a previsão de recalques em aterros sanitários, e novos modelos vêm sendo propostos, desde os puramente teóricos, até aqueles que se resumem ao ajuste de curvas quando já existe algum histórico de recalques (BOSCOV, 2008).

Para garantir a eficácia desses modelos é preciso garantir a eficiência da disposição de RSU, que contribuirá garantindo a segurança, principalmente da estabilidade estrutural do aterro, por isso é necessário conhecer os mecanismos que atuam sobre os aterros sanitários, bem como os parâmetros que os descrevem (DENARDIN, 2013).

Diante do exposto, o estudo desenvolvido nesta dissertação busca analisar o comportamento dos recalques através de aspectos experimentais de uma célula de aterro, na cidade de Campina Grande/PB, a partir de ensaios laboratoriais e medições de recalque *in situ*, e estatísticos através da tentativa de ajustes a modelos de previsão de recalques, verificando aquele que melhor se adéqua aos dados observados segundo critérios de R^2 (coeficiente de determinação), SQR(soma dos quadrados dos resíduos) e AIC (Critério de Akaike).

1.1.OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar o comportamento dos recalques em aterro de Resíduos Sólidos Urbanos, através de estudos experimentais, e da análise de como os dados experimentais se ajustam à modelos teóricos de previsão de recalque.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Entender o comportamento dos recalques em uma célula experimental, a partir de seus aspectos geotécnicos e do processo evolutivo de degradação dos resíduos.
- Estabelecer a caracterização física e geomecânica dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campina Grande/PB, que favorecem a ocorrência dos recalques ao longo do tempo.
- Quantificar os recalques da massa de resíduos aterrada, entendendo as relações estabelecidas durante a biodegradação dos resíduos depositados.
- Verificar o ajuste dos dados experimentais à quatro modelos de previsão de recalques consagrados na literatura, a partir dos processos iterativos de Gauss-Newton para funções não lineares.
- Testar, através dos critérios de R^2 , SQR e AIC, o modelo de recalque que melhor se ajusta aos dados em estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ASPECTOS GEOTÉCNICOS

2.1.1. Geotecnia Clássica

Um dos aspectos de interesse da geotecnia é a caracterização do solo e a determinação das deformações devido a carregamentos ocorridos na superfície de um terreno, para garantir a estabilidade e o comportamento funcional de uma obra.

A estrutura de um aterro de Resíduos Sólidos Urbanos, muitas vezes apresentam características e comportamento semelhante aos maciços de solos. Segundo Boscov (2008) o paradigma atual para o projeto de aterros sanitários é tratar os resíduos como uma nova unidade geotécnica e aplicar os conceitos da Mecânica dos Solos, incorporando peculiaridades do material quando necessário. Portanto, para entender a dinâmica de um aterro é preciso compreender conceitos básicos da geotecnia clássica.

A primeira característica que diferencia os solos é o tamanho das partículas que os compõem (PINTO, 2006). Quanto mais diversificados forem o tamanho e a forma das partículas, melhor será seu comportamento em aterros. Para analisar o que acontece com o maciço a partir do tamanho de seus grãos é necessário obter uma curva granulométrica a partir de ensaios laboratoriais. O ensaio granulométrico consiste no processo que visa definir, para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho de grãos, a porcentagem em peso que cada fração possui em relação à massa total da amostra (SANTI e TOMMASELLI, 2009). Segundo Pinto (2006), quando as partículas menores ocupam os vazios correspondentes às maiores, criando um entrosamento, tem-se uma boa graduação, da qual resulta em menor compressibilidade e maior resistência do maciço.

Outro processo geotécnico de grande importância é a compactação, que visa reduzir os vazios do solo, através da aplicação de cargas estáticas ou dinâmicas, aumentando a massa específica aparente e sua resistência.

Para garantir a resistência é fundamental aliar conceitos de adensamento e compressibilidade. A compressibilidade é entendida como a propriedade que alguns corpos têm de mudar de forma ou volume quando submetidos a uma força externa. Essa variação pode ocorrer de três formas: compressão, dilatação e deformação (VARGAS, 1977). Já o adensamento trata-se da deformação ocorrida em uma massa de solo cuja redução do seu

índice de vazios é dada em função do tempo e da tensão aplicada, correspondendo a um processo dependente da variação de volume do solo devido à retirada dos fluídos dos poros. O resultado mais prático desses dois fenômenos é o recalque, que é definido pela deformação vertical positiva de uma superfície qualquer delimitada pelo terreno.

Devido a preocupação crescente com o meio ambiente, a geotecnia ambiental surgiu com o objetivo de apresentar soluções para problemas ambientais, como a destinação dos resíduos sólidos. Da mesma forma como ocorre nos solos, também é essencial a obtenção de parâmetros geotécnicos confiáveis (OTSUKA, 2010).

Contudo, as características e propriedades dos resíduos sólidos urbanos são muito diferentes das do solo, e para sanar essas desigualdades é preciso melhorar a estimativa dos parâmetros geotécnicos dos RSU, e também buscar modelos de comportamentos mais adequados.

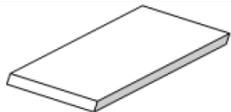
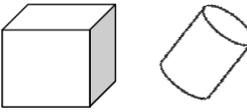
2.1.2. Geomecânica dos Resíduos Sólidos Urbanos

As principais propriedades geomecânicas dos RSU tais como a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade, são bastante influenciadas pela composição dos resíduos, bem como pelo comportamento de cada componente (BORGATTO, 2010). Porém, realizar a quantificação das propriedades geomecânicas dos RSU é uma tarefa difícil em razão de sua heterogeneidade, da dificuldade de obter amostras representativas e de alterações drásticas de algumas propriedades com o tempo (BOSCOV, 2008).

Para iniciar o entendimento de como se comportam esses materiais e suas propriedades, a normatização da *Deutsche Gesellschaft für Geotechnik* - DGGT (1994) estabeleceu de acordo com a forma de cada componente, que também tem influência no comportamento do maciço sanitário, a classificação morfológica dos resíduos (Quadro 1).

A morfologia dos RSU tem o intuito de classificar os resíduos quanto à sua forma e medida de acordo com as características relevantes para a mecânica dos resíduos. Segundo Soares (2011) esta classificação consiste na separação dos resíduos sólidos urbanos de acordo com a sua dimensão geométrica.

Quadro 1 - Classificação Morfológica dos RSU.

Dimensão	Características	Forma
0	Grãos diâmetro < 8 mm	
1	Fibras	
2	Folhas, Objetos planos	
3	Volumes	

Fonte: (DGGT, 1994).

Observa-se que o tamanho da partícula associada à composição, umidade e parâmetros geotécnicos, que compõem o resíduo, terão influência direta no comportamento mecânico deste material afetando as propriedades de resistência de um aterro sanitário.

2.1.2.1. Composição Gravimétrica e Volumétrica

A composição consiste na obtenção dos percentuais em peso e volume dos principais componentes dos resíduos. Essa composição permite uma avaliação do resíduo antes do acondicionamento, e como ele se comportará ao longo do tempo de aterramento. Segundo Leite (2008) os resíduos são constituídos por diferentes materiais (metais, plásticos, papéis, vidros, madeiras, têxteis, resíduos alimentares, entulho etc) que dispostos conjuntamente resultam em um material com propriedades mecânicas variáveis.

A composição gravimétrica permite o reconhecimento dos RSU quanto a sua quantidade em peso, que é expresso em percentual, e identifica a presença de cada componente, tratando-se da primeira etapa a ser realizada em um gerenciamento e transmitindo informações imprescindíveis a compreensão do comportamento dos resíduos.

Mariano *et al.* (2007) afirma que as análises de composição volumétrica servem como indicador de quanto cada tipo de resíduo ocupa em volume nas células de aterramento, e

mostra que a falta de programas de reaproveitamento, e reciclagem fazem com que os aterros diminuam a sua vida útil além de reduzir a quantidade da massa de resíduo a ser disposta, aumentando a presença de matéria orgânica. A quantidade e o tipo de resíduos orgânicos são fatores que exercem importante influência na taxa de produção de gases: quanto maior a fração orgânica biodegradável, maior será o potencial de produção de gases (van ELK, 2007).

O conhecimento da composição gravimétrica e volumétrica permite uma avaliação preliminar da degradabilidade, do poder de contaminação ambiental e das possibilidades de reutilização, reciclagem e valorização energética e orgânica dos resíduos (AIRES, 2013). Além disso, o conhecimento dos elementos que compõem a massa de RSU e o percentual que cada grupo de substância individualmente participa é de particular importância no estudo das propriedades geomecânicas haja vista que este parâmetro regerá o comportamento global deste em um aterro de resíduos (BORGATTO, 2010).

Alcantara (2007) afirma que a caracterização e o monitoramento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) envolvem parâmetros físicos que podem ser mais ou menos relevantes em função dos objetivos desejados e dentre os parâmetros mais importantes destacam-se as composições desses resíduos. A gravimetria e volumetria dos materiais pode melhorar o seu acesso aos microrganismos degradadores e, portanto, acelerar a decomposição dos RSU (MELO, 2011).

A composição dos resíduos tende a modificar-se diante de vários fatores, tais como população, escolaridade, poder aquisitivo, nível de renda familiar, cultura, industrialização, condições climáticas e sazonais. Caracterizar os resíduos quanto a sua composição gravimétrica e volumétrica torna-se uma importante ferramenta de gestão, pois tais composições são capazes de fornecer informações básicas para o monitoramento e avaliação de projetos ambientais, que são muitas vezes dificultados pela inexistência de procedimentos padrões de amostragem ou até pela heterogeneidade dos resíduos.

Segundo Soares (2011) existe uma variação significativa na percentagem dos principais componentes do RSU de uma região para outra, a qual, geralmente, está relacionada com os níveis de desenvolvimento econômico, tecnológico, sanitário e cultural dessas regiões. Para Rocha (2008) os resíduos têm composição tão variada que pode modificar-se de país para país, de cidade para cidade, de bairro para bairro e inclusive de um dia para o outro.

No Brasil, a quantidade de materiais orgânicos putrescíveis é elevada, variando em torno de 50% (ABRELPE, 2012), este valor sofre alterações quando os bairros ou regiões são

considerados separadamente. É marcante a diferença no teor de materiais putrescíveis em bairros de alto e baixo poder aquisitivo (BOSCOV, 2008).

Estudos realizados em Campina Grande/PB visando obter uma amostra representativa para a composição, apresentaram um plano de amostragem segundo critérios de condição social. Foram escolhidos, a partir de uma rota pré – estabelecida, três bairros (Mirante, Catolé e Argemiro Figueiredo) que segundo a Prefeitura Municipal de Campina Grande (PMCG) classificam-se como de classe alta, media e baixa respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1 - Composição Gravimétrica e Volumétrica de Campina Grande/PB.

	LEITE (2008)	MELO (2011)		
	Comp. Gravimétrica	Comp. Gravimétrica	Composição Volumétrica (%)	
			Solto	Compactado
Matéria Orgânica	69,53%	66%	38%	36%
Plásticos	11,44%	11%	29%	28%
Papel/papelão	6,23%	5%	7%	7%
Têxteis Sanitários	6,71%	4%	4%	4%
Compósitos	0,95%	1%	5%	4%
Vidros	1,18%	4%	4%	5%
Metais	0,71%	3%	5%	7%
Outros	3,24%	6%	8%	9%

Fonte: Leite (2008) e Melo (2011).

A composição tanto gravimétrica como volumétrica de Campina Grande demonstrou a elevada quantidade de matéria orgânica, Esse alto percentual de matéria orgânica nos resíduos depositados pode indicar elevado percentual de deformação da massa de resíduos resultando em grandes recalques (MELO, 2011).

Segundo Pereira *et al.* (2010) os valores acentuados de matéria orgânica são característico de países subdesenvolvidos e o alto teor de plásticos pode ser justificado, principalmente, pela presença de grande quantidade de invólucros de supermercados nos

resíduos, indicando que a triagem desse material não vem ocorrendo nos domicílios através de programas de coleta seletiva.

2.1.2.2. Teor de umidade

O teor de umidade de um maciço sanitário é muito importante na velocidade de degradação dos materiais putrescíveis e, conseqüentemente, no desenvolvimento de pressões neutras e recalques (BOSCOV, 2008).

Vários fatores influenciam no teor de umidade de RSU depositados em aterros, como a sua gravimetria, o clima da região, procedimentos operacionais de coleta, transporte e disposição final em aterros, sistema de cobertura e a própria umidade gerada a partir da degradação dos resíduos (SILVEIRA, 2004).

O teor de umidade inicial dos resíduos sólidos está relacionado com a água de constituição dos resíduos e com a água absorvida por estes da atmosfera, dependendo principalmente de sua composição, das condições climáticas, do processo de coleta, entre outros fatores (ANDRANDE, 2002). Já a umidade do material de cobertura do aterro, de acordo com Souza (2011), está relacionado com a quantidade de água presente no solo de cobertura e depende do tipo de material empregado, além da estação do ano (úmida ou seca).

Segundo Ribeiro (2012) umidades elevadas podem alterar o equilíbrio da degradação desestabilizando as fases da hidrólise a metanogênese. Além disso, a umidade pode alterar o comportamento mecânico, devido a precipitação, por exemplo, a água penetra pelos vazios existentes nas camadas de cobertura, e ao preencher esses vazios a camada expande dificultando o recalque, ao percolar, o líquido entra em contato com a massa de resíduos favorecendo reações biológicas e oxidativas, com características exotérmicas, que podem elevar a temperatura.

A umidade isoladamente não constitui um fator fundamental, mas deve-se considerar a necessidade de associação com outros parâmetros como temperatura, pH, compactação e composição dos resíduos (MERBACH Jr., 1989).

A variação de umidade, no interior da massa de resíduos com o tempo, é imprescindível na análise dos processos de degradação dos resíduos e na avaliação de propriedades geotécnicas dos mesmos, permitindo, assim, a avaliação da estabilidade estrutural dos aterros sanitários (SOUZA, 2011). No geral, não há uma tendência nítida de variação do teor de umidade em função da profundidade nos maciços sanitários, uma vez que

diversos efeitos podem se sobrepor, como entrada de água de chuva pela cobertura, a geração de chorume e as condições internas de drenagem do maciço (BOSCOV, 2008).

Para que haja a decomposição biológica dos resíduos sólidos, não há um valor de umidade considerado ideal, porém se a umidade estiver abaixo de 40%, pode haver limitação das reações biológicas de biodegradação e, abaixo de 20%, a decomposição é inibida (ALVES, 2012).

A umidade inicial dos resíduos é fundamental para garantir uma boa compactação do maciço sanitário, e conseqüentemente favorecer sua estabilidade. Em Campina Grande-PB a faixa inicial de umidade varia entre 50-60% (LEITE,2008; GARCEZ, 2009; MELO, 2011), esse teor tem ligação direta com a composição dos RSU, uma vez que pode ser atribuído à presença elevada de matéria orgânica. De acordo com Marques (2001) matéria orgânica como restos de alimentos, papéis, madeira e tecidos absorvem água ocasionando um valor excessivo dessa variável.

2.1.2.3. Peso específico dos RSU

Esta propriedade assim como para os solos, representa a relação entre o peso e o volume unitário na massa de resíduos, o seu valor varia de acordo com a etapa considerada, ou seja, desde sua geração até o destino final nos aterros, variando também com o tempo (BORGATTO, 2010).

Segundo Boscov (2008) a massa ou o peso específico dos RSU dependem principalmente da sua composição, onde elevados teores de materiais leves ou degradáveis acarretam menor peso específico. Seu valor também está diretamente ligado a distribuição granulométrica, pois alguns resíduos podem formar arranjos mais densos que outros, e ainda atrelada ao grau de compactação, afinal resíduos compactados tem características bem mais densas do que resíduos soltos.

O grau de compactação é fator preponderante no valor do peso específico, os valores encontrados podem variar de 3,0 a 7,0 kN/m³ para resíduos não compactados e valores de 9,0 a 13,0 kN/m³ quando aplicada uma compactação controlada (DE LAMARE NETO, 2004). Há uma tendência de elevação da densidade dos resíduos em função da profundidade, principalmente em razão da compressão exercida pela camadas subjacentes no interior do maciço sanitário.

Inicialmente o resíduos estão compactados a certo ponto aparente, este valor conseqüentemente aumenta devido ao incremento de carga específica como consequência da

superposição de outras camadas e recalques progressivos (TAPAHUASCO, 2009). Um alto peso específico inicial, associado a uma maior compactação, reduz tanto o recalque final como também as taxas de recalques primários e secundários (E-FADEL & KHOURY, 2000).

Em Campina Grande, estudos anteriores apresentaram faixas de pesos específico de acordo com o esperado pela literatura (Tabela 2).

Tabela 2 - Peso específico solto e compactado dos RSU de Campina Grande/PB.

	(GARCEZ, 2009)	(MELO, 2011)
Peso específico dos resíduos soltos	3,6 kN/m ³	4,0 kN/m ³
Peso específico dos resíduos compactados	6,5 kN/m ³	7,0 kN/m ³

Fonte: Garcez (2009) e Melo (2011).

Esses pesos específicos demonstram que o município apresenta valores aceitáveis para o bom funcionamento mecânico de um aterro, porém como tais características transformam-se com o tempo, é preciso ter o controle de como os RSU alteram suas densidades para garantir a estabilidade do maciço sanitário.

2.1.2.4. Distribuição granulométrica

A determinação da distribuição do tamanho dos componentes dos RSU é comumente realizada utilizando-se a análise granulométrica clássica da mecânica dos solos, devido à falta de um método padronizado para os resíduos sólidos urbanos (SOARES, 2011).

A granulometria dos resíduos acaba se tornando um dos mais importantes parâmetros estudados, pois o tamanho e a proporção dos grãos interferem diretamente na permeabilidade do solo, curva característica, capacidade de campo e outras características de estabilidade (CATAPRETA, 2008).

O tamanho da partícula que compõe o maciço sanitário tem influência direta no comportamento mecânico deste material, afetando as propriedades de resistência. Materiais mais finos levam a uma maior massa específica de resíduos em aterros sanitários, baixa permeabilidade a percolação de líquidos e a menor resistência ao cisalhamento devido à redução dos componentes fibrosos (BORGATTO, 2010).

A distribuição granulométrica dos resíduos varia com a idade destes, passando de material granular a fino e pastoso. Ao longo do tempo a biodegradação do material putrescível aumenta a fração fina do material (DIXON & JONES, 2005).

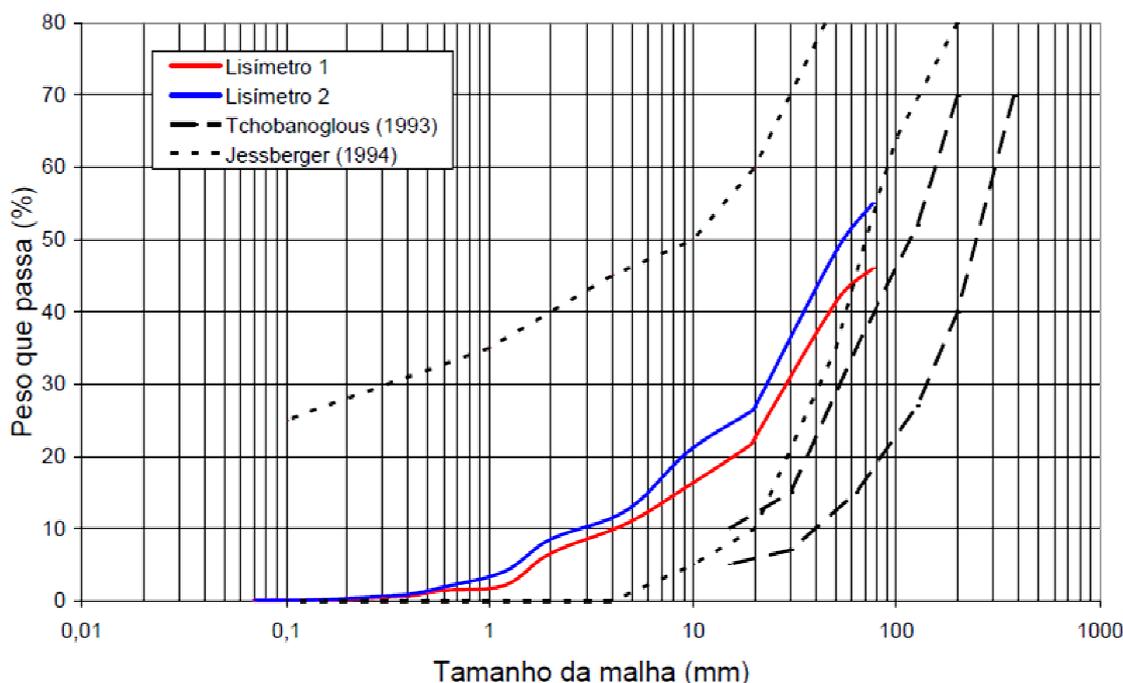
Assim, segundo Borgatto (2010) a composição granulométrica dos RSU os caracteriza como um material que apresenta elevado percentual de frações grosseiras (tamanho correspondente a pedregulhos) e com fração fina inferior a 20 % (partículas < 0,075 mm).

No estudo desenvolvido por Fatahi (2013) na Austrália, para resíduos coletados de um aterro desativado a mais de 30 anos, a análise granulométrica mostrou que 42 % das partículas estavam na gama de tamanho de cascalho, 38 % no intervalo de tamanho de areia e 20 % na gama de solos de grãos finos, mesmo depois de anos dispostos.

A velocidade de degradação ao longo do tempo aumenta consideravelmente quando a massa de resíduos é composta por frações menores, devido ao aumento da área superficial de contato (BORBA, 2006).

Alcântara (2007) encontrou uma fração de finos de 22,5% e 26,8% para os resíduos dos dois lisímetros estudados em sua pesquisa, as curvas granulométricas obtidas foram coerentes a faixa granulométrica proposta por Jessberger (1994), e aproximaram-se da faixa esperada por Tchobanoglous (1993), conforme Figura 1.

Figura 1 - Curvas granulométricas de resíduos dos Lisímetros 1 e 2.



Fonte: (ALCÂNTARA, 2007).

É preciso muita cautela para entender e comparar as características granulométricas dos resíduos com a literatura existente, primeiramente devido a heterogeneidade dos resíduos cujas características se alteram com o tempo e de lugar para lugar, e principalmente porque não há uma padronização da metodologia empregada para a realização do ensaio.

2.1.2.5. Compactação dos RSU

Um dos requisitos de operação do aterro se dá pela compactação dos resíduos sólidos, espessura das camadas, tipos de equipamentos compactadores e pelas condições do resíduo (DENARDIN, 2013). A estabilidade de um aterro depende da maneira em que os RSU estão conformados em seu interior. Para isso, é necessário que os resíduos sejam compactados de maneira adequada, evitando desmoronamentos, que possam ocorrer durante o processo de degradação.

A compactação dos RSU pode se destacar como o principal parâmetro a ser controlado dentre os aspectos que envolvem a operação dos aterros sanitários, dada a sua importância, tanto no que se refere à otimização da disposição, quanto da melhoria de propriedades geomecânicas de resíduos (DENARDIN, 2013).

O RSU é composto por diferentes materiais, onde uma grande parte dos componentes têm um índice de vazios elevado e uma alta compressibilidade. Uma das vantagens da compactação é que os espaços vazios dentro de um único componente e os espaços vazios entre os diferentes componentes podem ser reduzidos (FATAHI, 2013).

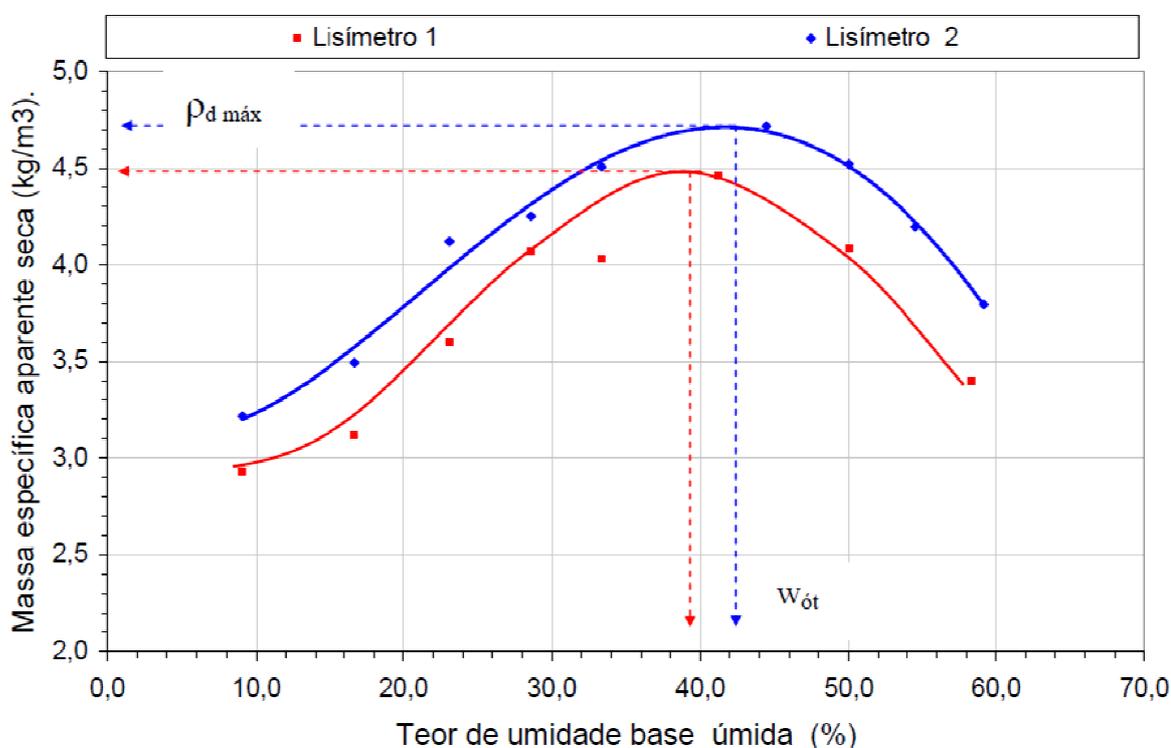
Desta maneira, a compactação empregada para resíduos sólidos procura, principalmente, reduzir os vazios através das operações de espalhamento e passagem de equipamentos apropriados sobre as camadas de resíduo, possibilitando um maior acondicionamento por unidade de volume, aumentando a vida útil do aterro. Assim como nos solos, espera-se que os resíduos compactados também apresentem melhores características mecânicas, especialmente, no que diz respeito a redução de recalques (ALCÂNTARA, 2007). Mendes (2009) relata que os recalques sofrem grande influência da compactação imposta à massa de resíduos. Uma boa compactação garante, também, aos maciços de um aterro sanitário, condições estruturais e de estabilidade (CATAPRETA *et al.*, 2003).

O estudo da compactação inclui a avaliação da influência de procedimentos construtivos e de outras variáveis na densificação do material, assim como do efeito da

compactação na compressibilidade dos resíduos e na geração de líquidos no aterro sanitário (MARQUES, 2001).

Estudos desenvolvidos por Alcântara (2007) apresentou curvas de compactação dos resíduos, com umidades ótimas de 39,5% e 42,2%, cujas características de contorno são semelhantes as encontradas para ensaios de solos, onde pode-se obter um ponto da curva em que a massa específica aparente seca do resíduos é máxima e a umidade é ótima (Figura 2).

Figura 2 - Curvas de variação da massa específica aparente seca em função da umidade do resíduos referente ao ensaio de compactação Proctor Normal.



Fonte: (ALCÂNTARA, 2007).

A compactação de resíduos também não apresenta valores bem definidos quanto a massa específica e umidade ótima, devido a sua heterogeneidade, os resíduos podem ser altamente compactados e seu peso específico ser aumentado em até 30%. Segundo Fakher (2006), o peso específico dos RSU não compactados varia entre 2,5 kN/m³ e 4,0 kN/m³, e compactado variando entre 4,5 kN/m³ e 8,5 kN/m³, faixas que corroboram com os valores encontrados por Alcântara (2007).

2.1.2.6. Compressibilidade e Recalques

Para uma apropriada análise de estabilidade, os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos urbanos (RSU) devem ser bem definidos a fim de representar seu verdadeiro comportamento mecânico (BORGATTO *et al.*, 2012).

A variável tempo é essencial na análise do comportamento de resíduos sólidos. Deve-se analisar as características de resistência e compressibilidade assumindo esta variável, já que o material é composto de resíduos inertes e biodegradável (PEREIRA, 2000).

A maioria dos resíduos depositados em aterros são formados por materiais altamente deformáveis, estes materiais podem apresentar grandes deformações ao longo do tempo quando submetidos a cargas constantes. Segundo GRISOLIA *et al.* (1995) materiais como metais, plásticos etc, quando submetidos à compressão, podem liberar líquidos ou gases retidos, apresentando uma aparente diminuição em seu volume ocupado pela fase sólida após a quebra. Já materiais como papel, papelão, têxteis, borracha etc, dobráveis ou deformáveis variam sua forma com o incremento de pressão.

Segundo Boscov (2008) a compressão de maciços sanitários resulta do carregamento e de alterações dos materiais componentes dos RSU. Os principais mecanismos de compressão são:

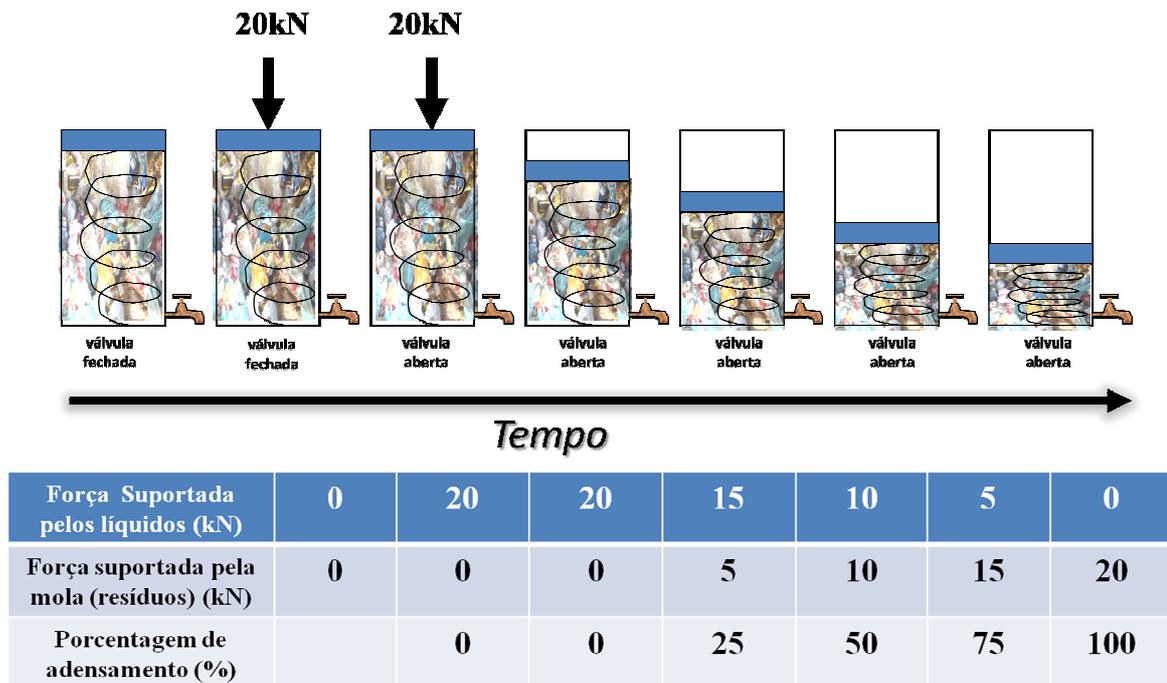
- Solicitação mecânica: distorção, dobra, esmagamento, quebra e rearranjo dos materiais.
- Ravinamento interno: erosão e migração de materiais finos para os vazios entre as partículas maiores.
- Alterações físico-químicas: corrosão, oxidação e combustão dos materiais.
- Biodegradação: degradação causada por micro-organismos, transferindo massa na fase sólida para as fases líquida e gasosa.
- Dissipação das pressões neutras de líquidos e gases: semelhante ao adensamento de solos, ocorre com a expulsão de líquidos e gases do interior do maciço e demanda certo tempo.
- *creep*: deformação lenta sob carga constante em razão de fenômenos viscosos.
- Interação dos mecanismos.

A compressibilidade é a relação independente do tempo entre a variação de volume e a tensão aplicada, esta propriedade assim como nos solos é suscetível à compressão. Porém,

quando se refere a maciços sanitários é preciso considerar que as deformações verticais que resultam nos recalques, acontecem com características semelhantes ao adensamento, que é o processo dependente do tempo de variação de volume do maciço devido à drenagem dos fluidos pelos vazios do resíduo.

Taylor (1948) desenvolveu um sistema de cargas e molas para explicar a teoria do adensamento aplicada a solos, semelhante a esse sistema a Figura 3 apresenta o comportamento dos RSU ao longo do tempo de acondicionamento, onde considerando-se cargas comuns a aterros e degradação constante, haverá sempre acomodação das partículas e expulsão de líquidos e gases.

Figura 3 - Comportamento dos RSU ao longo do tempo.



Fonte: Adaptada da analogia de Terzaghi (TAYLOR, 1948).

Com a expulsão dos fluidos da camada compressível considerada, o volume dos seus vazios vai diminuindo e, conseqüentemente, o seu volume total. Como a camada está confinada lateralmente, a redução do volume se dará pela redução de altura. Esta redução de altura é o que se denomina recalque por adensamento.

Porém, nem sempre a teoria e as hipóteses básicas de Terzaghi válidas para solos serão aplicáveis a resíduos sólidos urbanos, devido a presença de alguns materiais anisotrópicos que compõem os RSU (EL-FADEL & KHOURY, 2000). É preciso estar atento às características que os diferenciam, o Quadro 2 apresenta as discrepâncias dos RSU em relação à teoria clássica de Terzaghi aplicada a solos.

Quadro 2 - Hipóteses básicas da teoria clássica de Terzaghi aplicada a solos e a RSU.

Hipóteses aplicada a solos	Hipótese aplicada a RSU
O solo é homogêneo e saturado	Os RSU são heterogêneos e, embora possam ser saturados em laboratório, em aterros sanitários raramente encontram-se saturados.
As partículas do solo e água são incompressíveis	A maioria dos componentes dos RSU são altamente compressíveis.
O recalque é unidimensional	Os recalques nos aterros usualmente podem acontecer em duas ou três dimensões devido a não uniformidade da carga aplicada.
O fluxo dos fluidos segue a lei de Darcy, e a permeabilidade é constante	A lei de Darcy não é válida, há baixo gradiente hidráulico, assim como a permeabilidade não pode ser considerada constante para materiais altamente compressíveis.
Pequenas velocidades e deformações são desenvolvidas	Dependendo do tipo de resíduo, materiais com alta compressibilidade (orgânicos) apresentam elevadas velocidades e deformação.
A relação entre índice de vazios e esforços efetivos é linear	A curva recalque X tempo varia com a magnitude da taxa de aumento de carga e a compressibilidade das partículas não atendem a condição elástica linear.
Para o aumento de carga se desenvolve uma pequena deformação, e o coeficiente de compressibilidade é constante.	O índice de vazios mediante esforço constante decresce devido à compressão secundária.

Fonte: Adaptada de TAPAHUASCO (2009).

Analisando as diferenças entre solos e RSU, observa-se que a compressão do maciço sanitário é o resultado dos processos de carregamento e alterações das propriedades características dos materiais componentes dos RSU (TAPAHUASCO, 2009). Os recalques

em aterros podem ser atribuídos à compressão mecânica e decomposição biológica dos sólidos (LIU *et al.*, 2006).

Os resíduos sólidos dispostos em um aterro sofrem grandes recalques, com os quais seu volume diminui e sua capacidade de armazenamento aumenta, estando aí uma das principais causas de se quantificar os recalques (Mariano & Jucá, 1999).

Segundo Hossain *et al.* (2003) com o avanço da decomposição dos resíduos, as propriedades de compressibilidade, as taxas e a magnitude dos recalques também mudam. A identificação dos mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento de recalques em aterros de disposição de RSU é de extrema importância para a interpretação do comportamento, proposição de modelos de previsão e realização de simulações (Simões, 2000).

2.2. COMPORTAMENTO DOS RECALQUE EM ATERROS DE RSU

2.2.1. Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos

Os Resíduos Sólidos Urbanos são um problema na sociedade atual, onde muitas comunidades não possuem um destino correto e principalmente adequado para seus resíduos, e por consequência sofrem pressão por meio da legislação em vigor que exigem soluções para a destinação dos resíduos gerados nas cidades (NEHLS, 2012).

Segundo Rodrigues (2013) a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, Lei Federal nº12.305, de 02 de agosto de 2010 e de seu Decreto Regulamentador (Decreto Federal nº7.404, de 23 de dezembro de 2010) surgiu como um marco regulatório amplo para todo o território nacional. Ela proíbe a disposição de resíduos sólidos a céu aberto, método de destinação de RSU muito utilizado em todo o país, onde a partir de 2014, os municípios deverão implementar a disposição ambientalmente adequada. Diante de tal fato, a implementação de aterros sanitários surge como protagonista na busca da resolução dos problemas gerados pela má disposição dos resíduos (DANTAS, 2013).

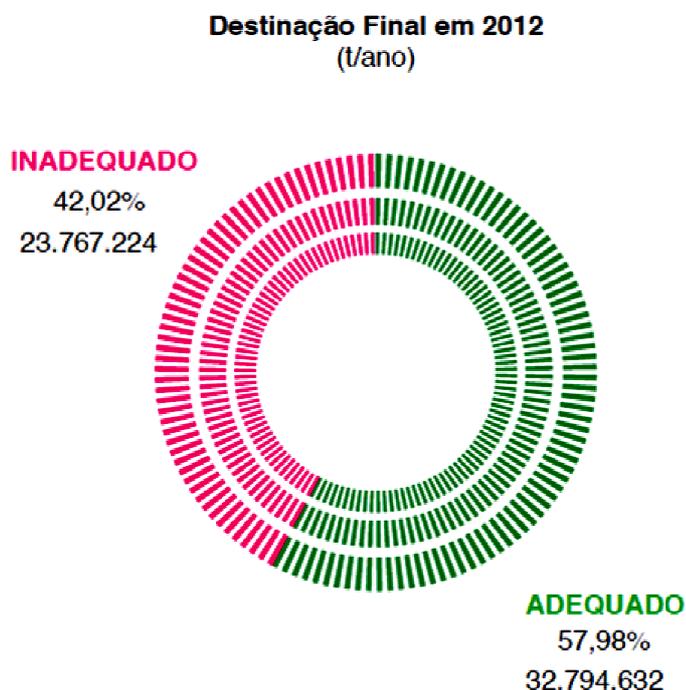
O aterro sanitário é um método para disposição final dos resíduos sólidos urbanos, sobre terreno natural, através do seu confinamento em camadas cobertas com material inerte, geralmente solo, segundo normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ao meio ambiente, em particular à saúde e à segurança pública (IBAM, 2001). Por isso, a destinação final é, dentre as dificuldades que se apresentam ao gerenciamento integrado dos RSU, a questão que adquire maior importância (DENARDIN, 2013).

O aterro sanitário compreende uma obra de engenharia projetada sob critérios técnicos específicos com finalidade de garantir a correta disposição sem causar danos, sendo considerado uma das formas mais eficientes e seguras de destinação de resíduos sólidos (VAN ELK, 2007).

Em aterros controlados os resíduos são cobertos com solo e eventualmente compactados, porém sem impermeabilização, drenagem e tratamento de líquidos e gases. Já os lixões são descargas a céu aberto, sem quaisquer medidas de proteção (DENARDIN, 2013).

No Brasil, 58% dos resíduos coletados são encaminhados para aterros sanitários, conforme analisado na Figura 4, onde os 42% restantes correspondem a 76 mil toneladas diárias, que são encaminhadas para lixões ou aterros controlados, os quais pouco se diferenciam dos lixões, uma vez que ambos não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações (ABRELPE, 2012).

Figura 4 - Destinação final dos RSU Coletados no Brasil.

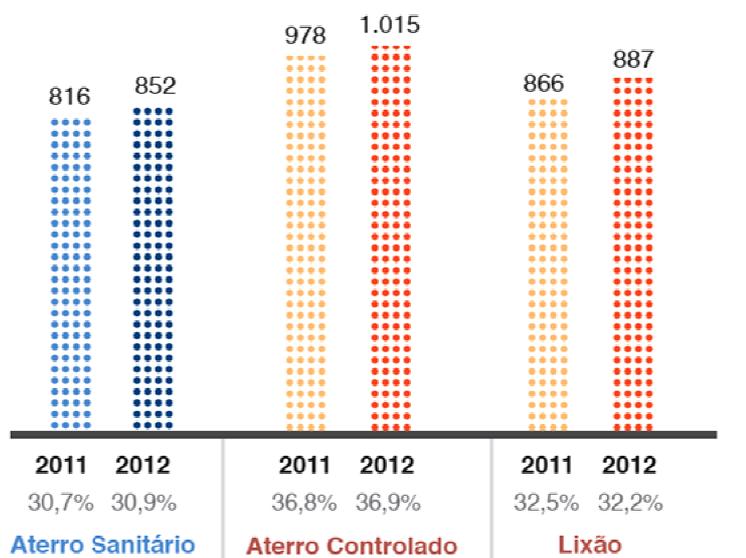


Fonte: ABRELPE, 2012.

A região Nordeste tem procurado manter iniciativas e desenvolver projetos ambientais que contribuam para que todos os estados construam uma sociedade ecologicamente sustentável e destine melhor seus resíduos (ALVES, 2012). Porém, ainda é preciso avançar

mais, segundo dados divulgados pela ABRELPE (2012) no nordeste apenas 35,6% dos resíduos são destinados a aterros sanitários. A Paraíba afasta-se ainda mais do cenário regional no que se refere a destinação final de RSU, uma vez que apenas 30,9% são destinados adequadamente, enquanto que a grande maioria de 69,1% recebem tratamentos não recomendados pela lei em vigência e que, conseqüentemente, não eliminam todos os impactos ambientais decorrentes geração de resíduos (Figura 5).

Figura 5 - Destinação Final de RSU no Estado da Paraíba (t/dia)



Fonte: ABRELPE, 2012.

Tal situação torna evidente a necessidade de se promover uma gestão adequada das áreas de disposição de resíduos, no intuito de prevenir ou reduzir os possíveis efeitos negativos que a disposição inadequada pode acarretar ao meio ambiente (MELO, 2011).

Entre os vários problemas da falta de controle nos locais de destinação final de RSU, Pereira (2000) destaca que a drenagem inadequada de lixiviados pode causar fraturas ao maciço, oferecendo perigo para o construção e risco de saturação da massa de resíduos, podendo haver também variações na superfície do solo, cujas áreas de depressão pode resultar em acumulação permanente de água, gerando uma carga adicional de resíduos e, portanto, ocasionar aumento de recalques diferenciais.

O recalque irá refletir o comportamento dos resíduos sólidos urbanos ao longo do tempo, e os aterros sanitários oferecerão condições de monitoramento e controle adequados

para entender as deformações verticais ocorridas a longo prazo, e ainda tal controle do recalque pode ser usado para prever o aumento da capacidade do aterro.

2.2.2. Recalque em aterros

A ocorrência de recalques em aterros sanitários tem sido bastante investigada nos aterros brasileiros nos últimos anos, face ao aumento do número dessas unidades e da necessidade de conhecimento do comportamento mecânico dos resíduos, principalmente quando estes podem oferecer riscos e comprometer a qualidade ambiental (CATAPRETA, 2008).

Na mecânica clássica já se afirmava que para se conhecer o comportamento geomecânico dos solos era extremamente necessária a obtenção de forma adequada dos parâmetros geotécnicos (TERZAGHI e PECK, 1948). O monitoramento geotécnico de um aterro sanitário exige a mesma qualidade na obtenção dos parâmetros.

Nesse sentido, uma importante contribuição da Geotecnia está relacionada à medição, análise e previsão de recalques nos aterros de resíduos sólidos urbanos que sofrem reduções volumétricas significativas, devido aos processos de degradação e a alta compressibilidade do resíduos (ALCÂNTARA, 2007).

Segundo LOPES & GOMES (2000) o acompanhamento dos recalques e das deformações horizontais do maciço de resíduos faz parte do monitoramento geotécnico do aterro e os mecanismos de recalques permitem a redução do volume ao longo do tempo da massa de resíduos. Essa diminuição no volume (Figura 6) é devida, principalmente, ao próprio peso dos resíduos e biodegradação da matéria orgânica com expulsão de gases e líquidos dos vazios formados (MONTEIRO *et al.*, 2006).

Figura 6 - Desenho esquemático do recalque em uma Célula de RSU (linha pontilhada).



Fonte: Adaptado de MELO (2011).

Em aterros de RSU acontecem três tipos de recalques: imediatos ou elásticos, primários e secundários.

A compressão imediata ou inicial é o resultado de pressões externas impostas por máquinas compactadoras no instante inicial da disposição. Dependendo da maquinaria utilizada e da densidade que se deseja, o recalque imediato será mais expressivo ou não, uma vez que os recalques provenientes de carregamentos feitos na superfície do terreno podem ser estimados pela teoria da elasticidade ou pela analogia edométrica (Marques *et al.*, 2002).

Segundo MELO (2011) o recalque primário ocorre devido à expulsão de líquidos e gases do interior da massa de resíduo. Isto tem sido considerado como um processo de consolidação, com um baixo valor de saturação e alta condutividade dos fluidos intersticiais (lixiviados e gases).

Já o recalque secundário ocorre principalmente devido a biodegradação conforme Melo (2003), este tipo de recalque se prolonga com o tempo e está relacionado com o decaimento biológico (transformação ou destruição de componentes orgânicos por decomposição biológica). Os recalques secundários e primários podem acontecer simultaneamente, embora o primário seja mais expressivo durante os primeiros 30 dias de monitoramento (Espinace *et al.*, 2000).

Segundo Melo (2003) os recalques secundários poderiam ser vistos como recalques primários nos solos, uma vez que ocorre a dissipação de líquidos e gases, resultando em deformações. Contudo, não se pode afirmar que recalques primários acontecem separadamente dos secundários, já que no momento de disposição dos resíduos, os grupos de microrganismos (bactérias aeróbias e anaeróbias, fungos, protozoários e vírus) começam a atuar na degradação biológica, tornando difícil a diferenciação do instante exato em que ocorrem recalques primários ou secundários. O mais razoável seria dizer que estes podem ocorrer simultaneamente durante a vida útil do aterro (MCDUGALL & PHILP, 2000; MELO, 2003).

Os recalques de maciços sanitários são muito elevados quando comparados com os dos maciços de solos (BOSCOV, 2008). Apesar de existirem diferenças significativas entre resíduos sólidos urbanos e solos, a interpretação dos recalques mediante conceitos da Mecânica dos Solos clássica pode ser proveitosa (FUCALE, 2005). A porcentagem da deformação em aterros sanitários, a partir de sua espessura inicial, variam bastante e podem ser observadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Recalque em maciços sanitários.

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

Fonte: Adaptado de BOSCOV (2008).

O acompanhamento desses recalques visa no primeiro momento verificar se as deformações medidas estão dentro de uma faixa aceitável, de modo que a integridade e o bom funcionamento dos sistemas estruturais do aterro estejam assegurados (ALCÂNTARA, 2007). Grande parcela dos recalques está ligada a degradação dos resíduos, realizar estudos com análises dos resultados de monitoramento desses sistemas em escala real ou experimental é imprescindível para o entendimento dos possíveis desvios ocorridos na fase de execução e implantação do projeto de aterro, e para redução de problemas ao logo do tempo de acondicionamento.

2.2.3. Estudos de recalques em escala experimental

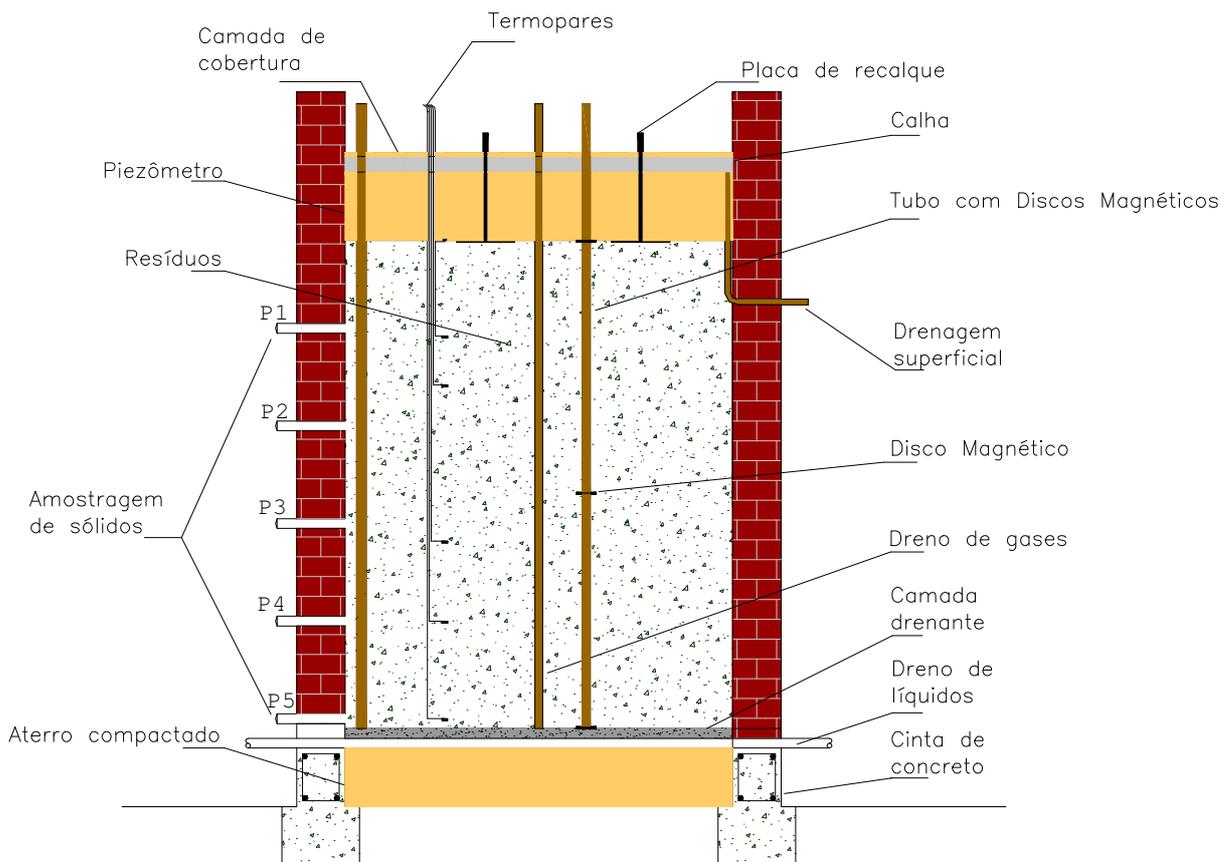
O estudo de aterros em escala experimental sugere através de seu monitoramento os possíveis ajustes que poderão ser aplicados em escala real, evidenciando a importância de se desenvolver e aperfeiçoar técnicas de monitoramento dos resíduos (FARIAS *et al.*, 2013).

As células experimentais de RSU simulam condições semelhantes a uma célula de aterro sanitário, além de auxiliarem na obtenção dos parâmetros para projetos, dimensionamento, construção e monitoramento de aterros, possuem as mesmas preocupações técnicas, somadas a estudos de utilização dos gases. Seu sistema de impermeabilização de topo e de drenagem de gases normalmente é mais eficiente do que ocorre em aterros sanitários e a recirculação dos líquidos podem ser utilizados para controle do processo de biodegradação (OTSUKA, 2010).

A vantagem desses estudos é a capacidade de simular e acelerar a decomposição aeróbia e anaeróbia dos resíduos, facilitando o conhecimento dos processos microbiológicos (BARLAZ *et al.*, 1989). Desta forma, pode-se analisar em escala experimental o comportamento real no sentido da perda de massa, para determinação de parâmetros importantes como os recalques em função do tempo.

As células experimentais de RSU apresentam soluções tecnológicas para destinação final dos resíduos, segundo Alcântara *et al.*, (2005), elas são constituídas por um eficiente sistema de drenagem de líquidos e gases, medição de nível dos líquidos, medidores de recalque superficiais e em profundidade, temperatura, concentração e fluxo de gases, conforme apresentado no esquema da Figura 7.

Figura 7 - Desenho esquemático de uma célula experimental de RSU, que simula condições de aterro sanitário.



Fonte: ALCÂNTARA *et al.*, 2005.

Segundo Garcez (2009) um estudo em escala experimental além de contribuir para o monitoramento do processo de biodegradação, também podem ter o custo menor que estudos feitos em aterros em escala real.

As células experimentais de pequenas dimensões, podem contribuir para a análise do comportamento de RSU, possibilitando, para situações particulares, uma melhor avaliação das propriedades físicas, químicas, físico-químicas e microbiológicas durante a evolução do processo de biodegradação (ALCANTARA, 2007). Essas propriedades proporcionam o conhecimento aprofundado dos mecanismos envolvidos na degradação ao longo do tempo sob condições conhecidas e controladas. Considerando todos esses fatores, é possível determinar o comportamento dos recalques e verificar a contribuição dos diversos parâmetros para ocorrência deste fenômeno.

Entender os recalques em um aterro torna-se menos complexo se estudos em escalas experimentais forem realizados. Daí a importância de se desenvolver e aperfeiçoar técnicas de amostragens e instrumentação para células experimentais de RSU.

Campina Grande-PB não possui um local adequado de disposição de resíduos, por muitos anos fez uso de lixões a céu aberto, e atualmente utiliza como destinação final o aterro de Puxinanã, município do estado da Paraíba, localizado a aproximadamente 7,7 Km de Campina Grande (FARIAS *et al.*, 2012). Mesmo com esse impasses, diversos estudos de resíduos em células experimentais foram realizados no município por Leite (2008); Garcez (2009); Meira (2009); Araujo (2011); Melo (2011); Alves (2012); Ribeiro (2012); Silva (2012) e Aires (2013), todos esses autores ressaltaram a importância do desenvolvimento dos estudos em escala experimental, visando compreender a dinâmica envolvida no processo de biodegradação dos resíduos sólidos, a fim de contribuir para construção e compreensão de futuros aterros em escala real.

2.3. MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES

A previsão de recalques em maciços sanitários deveria ser baseada nos mecanismos atuantes, mas alguns são muito complexos e de difícil quantificação (BOSCOV, 2008). Segundo Coduto & Huitric (1990), os mecanismos de recalque ocorrem de forma associada ao processo de recalque, de tal maneira que os mecanismos se confundem com as fases de ocorrência dos recalques. Essas fases seriam:

- Compactação, correspondente ao mecanismo de solicitação mecânica;
- Adensamento, correspondente ao mecanismo de dissipação de pressões neutras;

- Contração, correspondente ao mecanismo de “perda de sólidos” – biodegradação e alterações físico-químicas.

Vários autores comentam que a caracterização dos recalques em três fases, como ocorre em solos, é questionável pelo fato de que não se pode afirmar que as fases são independentes, pelo contrário, provavelmente elas se sobrepõem (DENARDIN, 2013).

A previsão dos recalques é muito importante para se conhecer as variações de volume de um depósito de resíduos e, desta forma, poder viabilizar soluções como a reutilização dessas áreas para atividades futuras de maneira segura, após o seu selamento (OTSUKA, 2010). Além disso, os recalques aumentam a capacidade de campo e a vida útil dos aterros sanitários de maneira significativa, devido as deformações, que segundo Qian *et al.* (2002) entre outros autores já citados, podem ser em torno de 30% em relação a altura inicial do depósito.

Para o Comitê Técnico (*Environmental geotechnics*) da International Society for Soil Mechanics and Foundating Engineering (ISSMFE, 1997) um bom modelo de previsão de recalques para os maciços sanitários deve ser dimensionalmente correto, definido a partir de um pequeno número de parâmetros com significado físico e relacionados a algumas propriedades conhecidas, além de ser capaz de separar a influência dos fatores relevantes na análise e fornecer revisões realistas e precisas, tanto quanto possível, em longo prazo.

O estudo das deformações em aterro tem coseguido avançar através da proposição de modelos matemáticos cada vez mais complexos que procuram integrar a biodegradação e o comportamento mecânico dos resíduos aterrados (ALCÂNTARA, 2004). A definição de um adequado modelo para previsão de recalques, assim como seus parâmetros de cálculo, apresentam-se como principal fator limitante nas análises de deformabilidade de aterros sanitários (MARQUES, 2001).

Diversos modelos matemáticos têm sido utilizados da tentativa de se estimar a redução volumétrica dos resíduos em função do tempo. Esses modelos podem ser divididos em convencionais, que são baseados, muitas vezes, na teoria de recalques de solos e modelos "biológicos", que levam em consideração a decomposição dos resíduos, analisando aspectos de leis que regem os processos de reações químicas e biológicas (ALCÂNTARA, 2007).

Segundo Boscov (2008), também são vários os problemas associados a interpretação e a utilização de modelos. Sabendo-se que a previsão dos recalques pode ser realizada durante o projeto ou durante a fase de operação, destaca-se a dificuldade de que no primeiro caso não se dispõe de dados de recalque, o que atrapalha bastante a previsão. Esta pode passar a ser

realizada através de estudos paramétricos, a partir de dados dos valores dos parâmetros de interesse disponíveis. Os principais modelos de previsão de recalques em aterros sanitários considerando essas dificuldades serão apresentados a seguir.

2.3.1. Modelo clássico de Sowers (1973)

O estudo sistemático dos recalques de maciços sanitários teve início com Sowers (1973), que adaptou a teoria de adensamento de Terzaghi para resíduos e utilizou parâmetros obtidos por ensaios de laboratório e monitoramento em campo, essa adaptação passou a ser denominada de Modelo Clássico de compressão de RSU (BOSCOV, 2008). O modelo proposto por Sowers (1973) considera a compressão inicial ou imediata; compressão primária e compressão secundária. O recalque final é a soma das parcelas, calculadas com base nas expressões da Teoria de Adensamento de solos. O modelo de Sowers assume que a curva de determinação secundária é linear com o logaritmo do tempo. Segundo Ouvry & Page (2005), este modelo é o mais amplamente utilizado para previsão de recalques.

$$S(t) = H(t_c) \times C_\alpha \times \log \left(\frac{t-t_0}{t_1-t_0} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: $S(t)$ = recalque secundário;

$H(t_c)$ = altura de resíduos após o recalque primário;

C_α = queda de tensão versus curva de log-tempo ou o índice de compressão secundária;

t = tempo decorrido;

t_0 = tempo inicial;

t_1 = tempo para o recalque secundário iniciar;

O modelo é sensível para valores de t_0 e t_1 utilizados, os quais são frequentemente difíceis de se identificar porque os recalques primários e secundários ocorrem simultaneamente.

Segundo Pereira (2000) o índice de compressão secundária C_α é considerado em função dos vazios existentes nos resíduos. Como esses vazios alteram-se com o tempo, o uso indiscriminado deste coeficiente pode minimizar a credibilidade do modelo.

2.3.2. Modelo logaritmo de Yen & Scanlon (1975)

Yen e Scanlon (1975) propuseram um modelo empírico para determinação da velocidade de recalque, baseado na compilação de resultados obtidos pelo monitoramento de três aterros durante um período de nove anos, no qual identificaram correlações entre as velocidades de recalque e as idades dos resíduos dispostos.

Neste modelo os autores sugerem que a taxa de recalques decresce linearmente com o logaritmo do tempo e cresce com a altura do aterro. Além disso, as observações e o modelo aplicam-se somente aos recalques de longo prazo (secundários). O modelo é expresso pela equação.

$$v = \frac{dS}{dT} = m - n \times \log t \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: v = taxa ou velocidade de recalque;

S = recalque;

t = tempo;

m e n = constantes empíricas.

As constantes empíricas variam com a espessura do aterro e com o tempo de construção. Este modelo deve ser ajustado a partir de dados de campo, pois costuma apresentar inconstância quando o tempo se torna muito grande.

2.3.3. Modelo hiperbólico de Ling *et al.* (1998)

Ling *et al.* (1998) analisando as limitações do modelo de Yen & Scanlon (1975) propôs a utilização de uma função hiperbólica para a estimativa de recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos. Este modelo incorpora em uma única equação os recalques primários e secundários, sendo o tempo inicial, o tempo corresponde ao início das medidas de recalque. O modelo Hiperbólico de Ling *et al.* (1998) é descrito pela Equação:

$$S = \frac{t}{\frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{S_{ult}}} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: t = diferença entre o instante considerado e o início das medidas ($t = t_i - t_0$);

S = diferença entre o recalque no instante considerado e o recalque inicial

($S = S_i - S_0$);

ρ_0 = taxa ou velocidade inicial de recalques;

S_{ult} = recalque final.

Os parâmetros ρ_0 e S_{ult} devem ser determinados pela transformação da Equação anterior através de relações t/S versus t e realizando uma análise de regressão linear:

$$\frac{t}{S} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{S_{ult}} \quad \text{Eq. 4}$$

Em que os inversos do intercepto e da inclinação fornecem os parâmetros ρ_0 e S_{ult} .

2.3.4. Modelo de Simões (2000)

Neste modelo os recalques são obtidos pela soma das parcelas devidas ao aspecto mecânico, envolvendo as variações de volume geradas pelo carregamento e pelo comportamento viscoso dos resíduos, além da decomposição da matéria orgânica presente e potencialmente degradável. Segundo as observações de Catapreta (2008) o comportamento dos resíduos é analisado para efeito de determinação da componente mecânica como um único material. Para a avaliação da componente resultante da decomposição biológica, o resíduo é tratado através de parâmetros de cada fração constituinte.

O modelo de Simões (2000) considera o histórico de tensões, possibilitando a estimativa dos recalques em variadas situações de carregamento, tanto na superfície do aterro quanto nas várias camadas de resíduo disposta. Considera-se que as camadas de cobertura são constituídas de materiais incompressíveis e de peso específico constante. Admitindo-se a validade do princípio da superposição, os recalques em cada camada de resíduo disposta são obtidos pela soma das três componentes:

$$\Delta H_{Total} = \Delta H_{carregamento} + \Delta H_{comportamento\ viscoso} + \Delta H_{biodegradação} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde: ΔH_{Total} = recalque total;

$\Delta H_{\text{carregamento}}$ = recalque devido à parcela mecânica;

$\Delta H_{\text{comportamento viscoso}}$ = recalque devido ao comportamento viscoso dos resíduos.

$\Delta H_{\text{biodegradação}}$ = recalque devido à biodegradação dos resíduos.

Cada parcela deve ser avaliada isoladamente para compor o modelo.

- Variação de volume devida ao carregamento:

$$\Delta H_1 = H_0 \times C_R \times \log \left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \right) \quad \text{Eq. 6}$$

Em que: ΔH_1 = recalque da camada de espessura inicial H_0 ;

P_0 = tensão total vertical inicial;

ΔP = acréscimo de tensão total vertical;

C_R = coeficiente de compressão.

- Variação de volume devido ao comportamento viscoso do resíduo:

$$\Delta H_2 = H_0 \times C_\alpha \times \log \left(\frac{t}{t_i} \right) \quad \text{Eq. 7}$$

Onde: ΔH_2 = recalque da camada de espessura inicial H_0 devido ao comportamento viscoso do material;

C_α = coeficiente de compressão viscoso;

t = tempo;

t_i = instante inicial.

- Componente Biológica

$$\Delta M_{ij} = M_{ij0} \times \left(1 - e^{-k_{ij}(t-t_0)} \right) \quad \text{Eq. 8}$$

Onde: M_{ij0} = massa inicial potencialmente biodegradável da fração constituinte i na camada j ;

k_{ij} = taxa de biodegradação da fração constituinte i na camada j ;

t = tempo

t_0 = tempo inicial.

2.3.5. Outros modelos de recalque

Diversos modelos de previsão do comportamento compressível dos RSU foram encontrados na literatura, ainda são poucos os que apresentam relação entre o processo de biodegradação e o recalque no tempo. Nos últimos anos, outras diversas variáveis foram consideradas para entender e prever o comportamento dos RSU em aterros sanitários.

Mcdougall & Phill (2001) apresentaram um modelo de biodegradação enzimática, baseado na decomposição da matéria orgânica, de acordo com uma cinética de hidrólise enzimática. Embora esse modelo não aborde o cálculo final da magnitude e velocidade dos recalques, é capaz de estimá-los indiretamente a partir da velocidade de degradação da matéria orgânica.

Machado *et al.* (2002) desenvolveram um modelo de previsão do comportamento mecânico dos RSU, utilizando para isso o modelo elastoplástico baseado na equação hiperbólica.

Marques *et al.* (2003) propuseram um método que estima as deformações através de três formas de recalque conhecidas, a resposta imediata ao carregamento, a compressão secundária e a compressão dependente do tempo de biodegradação, desconsiderando o recalque por consolidação ou primário. Para as estimativas dos recalques imediato e secundário foram utilizados modelos tradicionais, já o recalque devido a biodegradação considerado foi uma relação de decaimento exponencial. Neste caso não houve qualquer relação com os processos de geração de gases e líquidos.

Hossain & Gabr (2005) apresentaram um modelo de previsão de recalque, que quantifica a mudança das características dos materiais em função taxa de degradação do resíduo. Devido a biodegradação, a massa sólida orgânica é convertida em gás e ocorre um decréscimo do índice de vazios, resultando em recalque dos resíduos. O modelo foi desenvolvido baseado em ensaios de laboratório e comparado com recalques observados em vários aterros sanitários nos EUA.

Liu *et al.* (2006) desenvolveu um modelo a partir da teoria de consolidação não saturada e considerando os processos de biodegradação para previsão de recalques de aterros

sanitários em longo prazo. Os autores na formulação do modelo levaram em conta equações de pressão de gás para solução do problema.

Hettiarachchi *et al.* (2007) consideraram a geração e o fluxo dos gases, pela Lei de Darcy, e os relacionaram com as deformações dos RSU através do balanço de massas. Os resíduos foram separados em quatro camadas de acordo com sua biodegradabilidade, o que mostra uma flexibilidade interessante, pois o RSU possui diferentes composições para cada região. O processo de biodegradação é representado pela equação de decaimento de primeira ordem.

Machado *et al.* (2008) apresentaram um novo modelo incluindo o processo de biodegradação na deformação dos resíduos, através da variação das características do material e da variação da massa de matéria orgânica ao longo do tempo. A variação da massa foi relacionada indiretamente com o potencial de geração de gases também através de uma equação de decaimento de primeira ordem.

Tapahuasco (2009) desenvolveu, no Brasil, um modelo tomando como base a reformulação dos estudos apresentados Bjangard & Edgers (1990), pretendendo melhorar e dar maior consistência ao modelo, especialmente na formulação correspondente a parcela de compressão ao longo do tempo.

Otsuka (2010) desenvolveu um modelo matemático de previsão do comportamento mecânico dos RSU, com base na função hiperbólica amplamente utilizada para representar deformações em solos e resíduos, que foi modificada de tal modo que o processo de decaimento da massa orgânica pudesse ser acoplado aos parâmetros de resistência do material. A variação da massa foi relacionada com as gerações de gases e líquidos.

Recentemente Wei (2012) apresentou um novo modelo matemático que leva em conta a teoria de consolidação de solos e a ação química e biológica no processo de deformação. Segundo este autor o modelo pode ser útil para o projeto, manutenção e reutilização de área de aterros de resíduos sólidos urbanos. Para verificar a compatibilidade desta proposta foram analisados dois aterros de resíduos sólidos na China.

Também na China, Chen *et al.* (2013) preocupados com a estabilidade dos resíduos em aterros com elevadas pressões exercida por líquidos e gases, desenvolveu um modelo bio-hidro-mecânico a partir de investigações laboratoriais e *in situ*, para prever a produção de lixiviados, pressão do gás e os recalques. Com base na previsão obtida pelo modelo proposto, foi possível realizar discussões para solucionar problemas geoambientais em aterros com elevada carga orgânica, que demonstrou-se eficaz no desenvolvimento de novas tecnologias.

2.4. ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DOS MODELOS DE RECALQUE

A concepção de um modelo que considere todos os mecanismos relevantes, cujos parâmetros possam ser obtidos por ensaios laboratoriais e observações de campo não é tarefa simples. Diante desta realidade, Boscov (2008) afirma que as principais vertentes da modelagem de desenvolvimento de recalque em maciços sanitários são aplicar modelos de previsão de recalques de solos, com as devidas adaptações, elaborar modelos que tentem reproduzir os mecanismos relevantes para os RSU, e formular modelos empíricos, que são ajustes de curvas com equações cuja séries históricas de dados é conhecida.

A realização ou desenvolvimento de um modelo de recalque exige práticas e conhecimentos que vão além da engenharia geotécnica. Para adaptar os conceitos de solos ao comportamento dos RSU em aterros, e até mesmo entender a mecânica dos resíduos a partir de modelos já consagrados na literatura, é preciso fazer uso dos diversos recursos existentes na estatística. Esta ciência torna possível a explicação e validação da ocorrência de uma série de dados, através de estudos observacionais capazes de modelar a aleatoriedade e a incerteza dos eventos estudados, de forma a estimar ou possibilitar a previsão de fenômenos futuros, para melhor compreender as situações.

Segundo Sanches & Furlan (2007) ao se tentar representar um fenômeno do mundo físico por meio de um modelo matemático, raramente se tem uma descrição correta deste fenômeno. Normalmente, são necessárias várias simplificações para que se tenha um modelo que leve em consideração a relevância dos fatores e a precisão dos dados de entrada.

Para validar a ocorrência de recalques é necessário observar os dados obtidos experimentalmente e analisar se eles convergem positiva ou negativamente para modelos teóricos consolidados na literatura. Os estudos de convergência podem ser realizados para equações e modelos com características lineares e não lineares.

Nos modelos lineares, para estimativa dos parâmetros deve-se resolver um sistema de equações lineares com relação aos coeficientes de regressão desconhecidos. Nesta situação existe uma solução única e, portanto, obtêm-se uma forma analítica de estimativa dos parâmetros. Esta forma é a mesma para qualquer modelo e qualquer conjunto de dados.

Neste caso, os coeficientes são combinações lineares das observações, pela teoria estatística, demonstra-se que a distribuição dos coeficientes de regressão linear seguem uma distribuição normal, o que possibilita a realização de testes de hipóteses e cálculo dos intervalos de confiança para esses coeficientes.

Segundo Paiva (2009), a teoria clássica da estatística baseia-se na distribuição contínua mais importante e mais utilizada, que é a distribuição normal já citada, geralmente corresponde a uma curva normal ou curva de Gauss. Sua importância está no fato de que muitas técnicas estatísticas testam a normalidade dos dados. Quando os dados fogem a esse tipo de distribuição, lança-se mão de recursos de transformação para poder analisá-los através de sua aplicação.

Existe muitas situações nas quais não é possível descrever um fenômeno através de um modelo de regressão linear. Nesses casos, passa-se a entender o modelo como de características não lineares, onde ao invés de se fazer uma descrição puramente empírica do fenômeno, pode-se garantir uma relação teórica entre as variáveis observáveis de interesse, com base em suposições importantes sobre o problema. Ao contrário do modelo linear, os parâmetros entram na equação de forma não linear, assim, não se pode simplesmente aplicar fórmulas para estimar os parâmetros do modelo (MAZUCHELI & ACHCAR, 2002).

Entre as vantagens dos modelos não lineares destaca-se a obtenção de parâmetros que são facilmente interpretáveis. E em muitas situações, usa-se menos parâmetros nos modelos não lineares do que nos lineares, isto simplifica e facilita a interpretação, outras características e vantagens sobre modelos não lineares são observadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Alguns aspectos do uso de modelos Não lineares comparados a modelos lineares.

ASPECTO SOBRE USO DE MODELOS NÃO LINEARES	
VANTAGENS	DESVANTAGENS
Os modelos não lineares tem uma base teórica, onde seus parâmetros fornecem um maior conhecimento sobre o fenômeno em estudo do que os modelos lineares.	Existem modelos que são intrinsecamente não lineares, isto quer dizer que não podem ser linearizados por transformação.
Os modelos não lineares, geralmente fornecem um bom ajuste, com menos parâmetros do que os modelos lineares o que simplifica e facilita a interpretação.	A transformação de um modelo não linear em um modelo linear, apesar de facilitar o processo de ajuste, fazem suposições não realísticas sobre o termo dos erros, perdendo informações sobre os erros padrões dos parâmetros originais.

Pode-se usar variáveis contínuas como variáveis independentes, e elas são capazes de indicar a presença ou ausência de um grupo, tornando possível a codificação das diferenças entre indivíduos.

A estimação de modelos não lineares, é um bom exemplo de que se obter os resultados no computador, não significa que os resultados sejam corretos ou razoáveis.

Os modelos não lineares geralmente são escritos segundo a estrutura da Equação 9:

$$Y_i = f(X_i, \gamma) + \varepsilon_i \quad \text{Eq. 9}$$

Onde $f(X_i, \gamma)$ é uma função não linear e ε_i representa os erros. Assume-se que os erros apresentam distribuição normal, são independentes e com variância constante. γ é o vetor de parâmetros do modelo.

Semelhantes a esta estrutura, os modelos de Sowers (1973), Yen & Scalon (1975), Ling *et al.* (1998), Simões (2000) e os demais modelos de recalque da literatura assumem características não lineares, e para verificar a convergência de dados experimentais à esses modelos é preciso utilizar-se de métodos capazes de resolver sistemas de equações não lineares. Nesta situação utiliza-se os métodos iterativos que forneçam a solução do sistema com uma determinada precisão requerida.

Em modelos não lineares não é possível encontrar formas analíticas para os estimadores de mínimos quadrados ou de máxima verossimilhança que solucionem o sistema. Ao invés disso, métodos numéricos devem ser usados juntamente com os métodos iterativos, e isto requer cálculos computacionais intensivos, através de *Softwares*.

A busca de soluções dos problemas de mínimos quadrados não lineares e de otimização é objeto de interesse em várias áreas da ciência e das engenharias. Devido a sua velocidade de convergência e eficiência computacional, os métodos de Gauss-Newton têm sido bastante utilizados para o propósito de obter estas soluções (GONÇALVES, 2011).

2.4.1. Métodos iterativos de Gauss-Newton

Na maioria dos problemas com modelos não lineares, é mais prático encontrar as estimativas por procedimentos de procura numérica direta do que, inicialmente, obter as

equações normais. Sendo mais viável portanto, usar métodos numéricos para encontrar a solução dessas equações iterativamente.

Estes métodos resultam por vezes de melhorias de métodos de otimização já existentes, melhorias estas possíveis dada a estrutura específica do problema, que aliados à velocidade dos computadores permitem resolver as estimativas no contexto da regressão não linear, algo impensável há décadas atrás (MORAIS, 2003).

O método de Gauss-Newton e suas variações são os mais eficientes métodos iterativos conhecidos para resolver problemas de mínimos quadrados não lineares e de otimização de composição convexa (GONÇALVES, 2011). Também conhecido como método da linearização, usa uma expansão em série de Taylor para aproximar o modelo de regressão não linear com termos lineares e, então, aplica mínimos quadrados ordinário para estimar os parâmetros. Iterações desses passos geralmente conduzem a uma solução para o problema de regressão não linear.

O procedimento deste método inicia arbitrando-se valores aos parâmetros, cada coeficiente de regressão obtido representa a diferença entre os verdadeiros parâmetros da regressão e das estimativas iniciais.

Assim, os coeficientes de regressão representam uma correção que deve ser feita nos coeficientes de regressão iniciais. O propósito de ajustar o modelo é estimar os coeficientes de regressão e usar essas estimativas para corrigir as estimativas iniciais dos parâmetros de regressão. A convergência dos métodos de Gauss-Newton pode falhar, ou mesmo deixar de gerar uma sequência infinita. Para assegurar a convergência dos métodos e fornecer a solução dos respectivos problemas, alguns critérios devem ser impostos (GONÇALVES, 2011).

Nestas condições a verificação do melhor ajuste dos modelos de recalque associados a biodegradação, além de utilizar como análise o critério iterativo de Gauss-Newton, também deve verificar os parâmetros estatísticos: soma dos quadrados dos resíduos (SQR), coeficiente de determinação (R^2) e o critério de Akaike.

2.4.2. Teste dos modelos

Para avaliar o melhor modelo que ajuste um determinado conjunto de dados, é preciso adotar requisitos que descrevam satisfatoriamente a relação existente entre as variáveis independentes e a variável resposta.

O modelo adequado, exige uma investigação das suposições feitas para o seu desenvolvimento. Para tanto, estuda-se o comportamento do modelo usando o conjunto de

dados observados, notadamente as discrepâncias entre os valores observados e os valores ajustados pelo modelo, ou seja, faz-se uma análise dos resíduos (BUSSAB & MORETTIN, 2006).

A análise de dados para os modelos de planejamento de experimentos, e consequentemente a obtenção de seus resíduos, fica praticamente inviabilizada sem o uso de softwares específicos.

O software STATISTICA® é uma das ferramentas computacionais usadas neste sentido, que conta com um programa integrado para gerenciar análise estatística e base de dados, caracterizando uma ampla seleção de processo analítico, para as mais diversas áreas. O sistema não inclui somente procedimentos estatísticos e gráficos gerais, mas também, módulos especializados como análise de regressão, análise de sobrevivência, séries temporais, análise fatorial, análise discriminante e diversos outros módulos (OGLIARI & PACHECO, 2004).

A ferramenta computacional ajusta os dados, coletados experimentalmente, ao modelo em teste, e gera, a partir do método iterativo de Gauss-Newton, a curva de ajuste, os resíduos da regressão, o coeficiente de determinação, entre outras observações. A análise, somente, da curva gerada já possibilitaria uma boa interpretação da convergência do modelo testado, porém, existem outros critérios estatísticos que são comumente utilizados para avaliar os modelos. Dentre os existentes, é fundamental entendermos alguns deles:

2.4.2.1. Coeficiente de determinação - R^2

O Coeficiente de determinação (R^2), configura-se como um coeficiente que mede o quanto a variável dependente pode ser explicada pela equação de regressão (SNEDECOR & COCHRAN, 1989). Ou seja, através do R^2 , pode-se inferir se determinado modelo é adequado ou não para explicar a variação de uma determinada variável em estudo.

O coeficiente de determinação pode assumir valores de 0 a 1, salientando que valores próximos de 1 atestam que a relação entre variáveis independentes e a variável dependente (ou variável resposta) podem ser satisfatoriamente explicadas através da regressão encontrada, indicando bom ajuste. Já a observação de R^2 baixos, próximos de zero, denotam que o modelo (representado pela equação) não consegue explicar a relação existente entre as variáveis. analiticamente o coeficiente de determinação pode ser encontrado pela equação:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_E - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_O - \bar{X})} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde; R^2 = Coeficiente de determinação;

n = Número de variáveis;

X_E = Variáveis estimadas;

X_O = Variáveis observadas;

\bar{X} = Média das variáveis.

Desta forma, utiliza-se o R^2 como critério, considerando que quanto maior for o seu valor, melhor é o ajuste do modelo (RODRIGUES & LEMMA, 2009). Entretanto, o R^2 é sensível ao aumento de variáveis independentes no modelo, observando-se também um aumento do mesmo, que pode não corresponder à realidade, já que nem todas as variáveis estimadas possuem efeito significativo para a obtenção da variável resposta. Desta forma, o aumento do R^2 não está associado somente ao efeito das variáveis, mas também ao número de dados observados no modelo.

2.4.2.2. Soma de Quadrados dos Resíduos (SQR)

A Soma dos quadrados do resíduo (SQR) é o critério para ajuste de modelos que baseia-se na observação da soma dos quadrados do resíduo, sabendo-se que quanto menor a SQR, melhor o modelo descreve a relação entre as variáveis estimadas e a variável resposta (SNEDECOR & COCHRAN, 1989). Pode-se obter a soma dos quadrados dos resíduos pela expressão:

$$SQR = \sum_{i=1}^n (X_E - X_O)^2 \quad \text{Eq. 11}$$

Onde: SQR = Soma dos quadrados dos resíduos

n = Número de variáveis;

X_E = Variáveis estimadas;

X_O = Variáveis observadas.

O uso da SQR apresenta uma limitação, onde seu valor depende do tamanho da amostra, ou seja, para amostras pequenas, a variação do resíduo diminuirá muito, afetando os graus de liberdade do resíduo e, conseqüentemente, afetando a relação existente entre variação do acaso e efeito de tratamento. Uma forma de minimizar problemas deste tipo é o uso do quadrado médio dos resíduos como critério de escolha.

2.4.2.3. Critério de AKAIKE -AIC

O AIC (critério de informação de Akaike) constitui-se como um critério para a seleção do melhor modelo de regressão. O mesmo é baseado na teoria da informação, partindo do pressuposto de que existe um modelo verdadeiro, que satisfatoriamente descreveria o comportamento das variáveis, contudo, este modelo é desconhecido (SAKAMOTO, ISHIGURO & KITAGAWA, 1986). Portanto, através do AIC, tenta-se escolher dentre um grupo de modelos, aquele que mais se aproxima da realidade.

Esta medida leva em consideração a qualidade da ligação entre as variáveis e o número das mesmas que são utilizadas no modelo. Para isso, são calculados os logaritmos das razões de verossimilhança entre os modelos, penalizando os modelos pelo número de parâmetros. Assim, o AIC avalia a qualidade da ligação entre as variáveis e o número de variáveis utilizadas.

$$AIC = n \times LN \left(\frac{SQR}{n} \right) + 2K \quad \text{Eq. 12}$$

Onde, n = Número de observações;

LN = Logaritmo na base Neperiana;

SQR = Soma dos quadrados dos resíduos;

K = Número de parcelas do modelo, inclusive o intercepto.

Ao testar dois ou mais modelos, o que resultar no menor valor de AIC é o mais significativo, pois é capaz de explicar mais o fenômeno em estudo com um número menor de parâmetros.

3. METODOLOGIA

Esta pesquisa foi realizada na cidade de Campina Grande/PB, que não possui um aterro sanitário, por isso, fez-se necessário a utilização de conhecimentos técnicos e científicos para reproduzir uma célula experimental de RSU simulando as mesmas condições de um aterro e possibilitando o desenvolvimento dos estudos.

A Célula Experimental foi alocada no Campus da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, e os ensaios envolvidos foram realizados nos Laboratórios de Geotecnia Ambiental e Laboratório de Solos, pertencentes a Unidade Acadêmica de Engenharia Civil. Todas as atividades da pesquisa demonstraram-se bastante complexas, e só possíveis de serem realizadas devido ao apoio da equipe multidisciplinar formada pelo Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA), que contribuíram na execução das etapas discriminadas na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma das etapas executadas na pesquisa.



3.1 CÉLULA EXPERIMENTAL DE RSU

A Célula Experimental de RSU corresponde a uma célula de aterro sanitário, cujas condições de operação e monitoramento são conhecidas e controladas. Segundo Aires (2013) as células experimentais são de fácil operação, podendo ser construídas com maior rapidez e contando com custos relativamente baixos.

3.1.1 Construção

A construção foi realizada com alvenaria de tijolos manuais, cujas dimensões da célula Experimental compreenderam um diâmetro de 2,0m e altura de 3,5m, atingindo uma capacidade volumétrica de aproximadamente 11m³. A estrutura foi construída e planejada para atingir um formato cilíndrico rígido cuja seção transversal circular, facilitasse a distribuição uniforme dos resíduos, e favorecesse a compactação em seu interior. Cada detalhe foi minuciosamente executado, para garantir o controle e monitoramento da célula experimental (Figura 9).

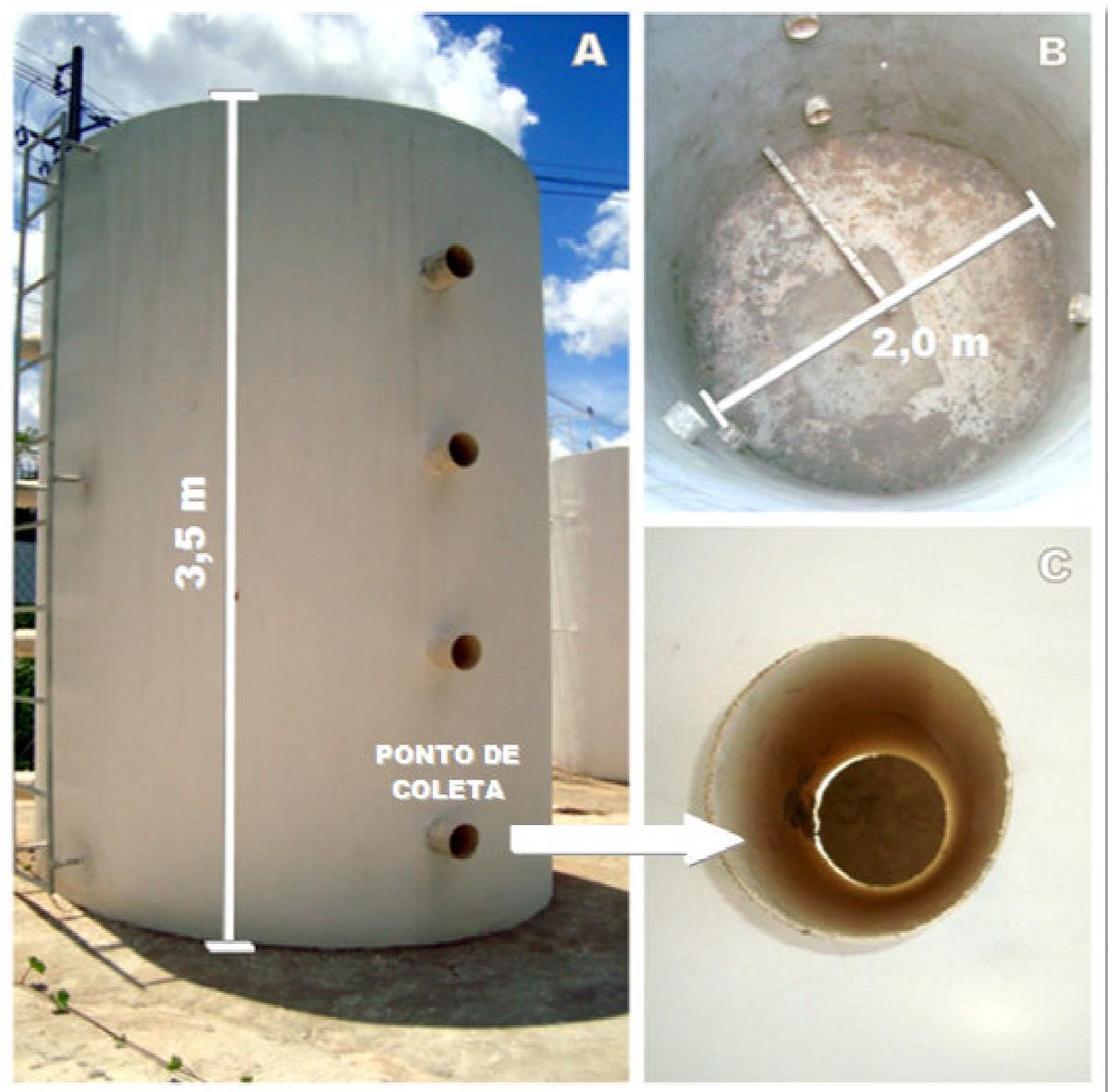
Figura 9 - Detalhes construtivos da célula experimental em alvenaria de tijolos manuais.



Tal dimensão e formato foram determinantes para garantir também a uniformização na distribuição das pressões exercidas pela parede da célula experimental, característica que inviabilizou a formação de caminhos preferenciais a percolação do lixiviado e reduziu a área superficial de contato entre os resíduos e a parede interna da estrutura.

A estrutura apresenta uma escada de acesso, para inserção dos resíduos, execução das camadas impermeabilizantes e monitoramento ao longo do tempo, além de contar com 12 orifícios de entrada, em PVC de 150mm de diâmetro, distribuídos em diferentes níveis de profundidade, para coleta de resíduos (Figura 10).

Figura 10 - A: Célula experimental com formato cilíndrico de 3,5 m de altura; B: Vista interna da Célula em estudo; C: Destaque de um dos pontos de coleta de RSU.

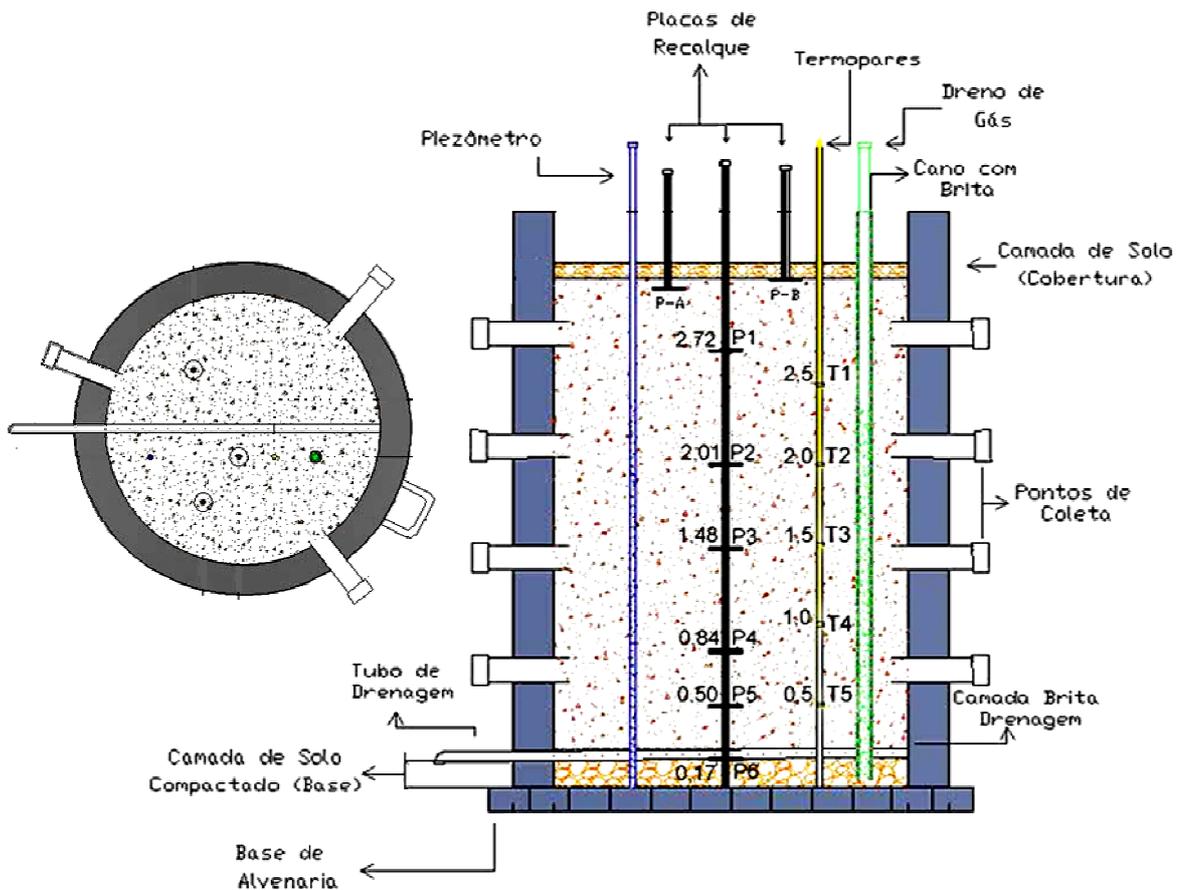


3.1.2 Instrumentação

A Célula Experimental utilizada nesta pesquisa foi instrumentada com um sistema eficiente de drenagem de líquidos e gases, medidores de nível dos líquidos, medidores de recalques superficiais e em profundidade, além de medidores de temperatura. A instrumentação instalada foi baseada na literatura técnica e na instrumentação comumente utilizada para operação e monitoramento de aterros sanitários em escala real, adotando-se as adaptações necessárias ao estudo científico.

A disposição de todos os instrumentos no interior da Célula Experimental pode ser observada na Figura 11, onde o posicionamento de cada elemento foi planejado para facilitar o monitoramento dos parâmetros ao longo do tempo.

Figura 11 - Desenho esquemático da Célula Experimental.



Cada elemento destacado possui função de grande importância para o funcionamento da Célula de resíduos, tais funções e como cada instrumento foi confeccionado pode ser entendido a partir do Quadro 5.

Quadro 5 - Instrumentação utilizada para operação e monitoramento da Célula Experimental.

Instrumento	Função	Confeção
<p>Piezômetro</p> 	<p>Monitorar os nível de líquidos percolantes gerados no interior da célula experimental, através de um sensor de nível de água.</p>	<p>Consistiu em perfurar um tubo de PVC de 25mm, com furos nas paredes de sua estrutura e coberto com tela de nylon.</p>
<p>Termopares</p> 	<p>Monitorar as temperaturas no interior do lisímetro, em cada profundidade preestabelecia. Os termopares consistem em um par de metais de cobre e cromo unidos em uma ponta, que são sensíveis à temperatura.</p>	<p>Foram instalados cinco termopares do tipo K em torno de um cano PVC a cada 0,5m de profundidade. A corrente elétrica gerada proporcional à temperatura é medida na superfície por um termômetro elétrico.</p>
<p>Placas de Recalque</p> 	<p>Monitorar as deformações verticais dos resíduos ao logo do tempo. As placas de recalque superficial monitoram a deformação total da Célula em estudo, e as placas de profundidade medem o recalque em cada camada.</p>	<p>Foram utilizadas seis placas circulares de recalques em profundidade com diâmetros aproximados de 150 mm, e duas placas superficiais, todas confeccionadas em aço e revestidas com uma película anti-corrosiva.</p>
<p>Tubo de Drenagem do Gás</p> 	<p>Garantir a saída por ascensão dos gases gerados pela degradação dos Resíduos. A ponta superior da tubulação de gás é acoplada a uma torneira, para facilitar a medição dos gases com um sistema adaptado para controle de saída do gás.</p>	<p>Utilizou-se dois tubos perfurados de PVC, um com 100mm de diâmetro instrumentado para proteção do segundo com 40mm de diâmetro, inserido no interior do tubo maior e envolvido por brita (19mm), para evitar a obstrução dos furos.</p>
<p>Dreno de Líquidos</p> 	<p>Posicionando na base da Célula Experimental, tem a função de drenar todo o lixiviado produzido pela degradação dos RSU e percolado para o inferior da estrutura.</p>	<p>Elaborou-se um tubo de PVC perfurado com 40mm, atravessando diametralmente a Célula com saída lateral controlada e sobre uma camada de pedra britada, com inclinação para o centro.</p>

3.2 AMOSTRAGEM DOS RESÍDUOS

Em pesquisas anteriores realizou-se a amostragem dos RSU utilizando três bairros de diferentes classes sociais, mas, para melhor caracterizar os resíduos, neste trabalho, percebeu-se a necessidade de realizar uma amostragem representativa sobre o ponto de vista estatístico.

3.2.1 Plano estatístico

Para obter amostras representativas dos RSU da Cidade de Campina Grande/PB verificou-se a necessidade de se estabelecer um plano de amostragem, através de um planejamento estatístico, que baseou-se nas informações obtidas junto a Diretoria de Limpeza Urbana (DLU) e ao Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE). Foram utilizados dados do censo populacional e da geração de resíduos (IBGE, 2010), para desenvolver uma metodologia capaz de representar a composição dos resíduos sólidos urbanos da cidade.

Considerando uma população de 385.213 hab, e a quantidade de resíduos gerados por habitante, obteve-se um plano estatístico, que considerando a delimitação da cidade em quatro diferentes zonas, selecionou com 95% de confiança os locais de coleta dos RSU a serem amostrados, admitindo-se um erro máximo de 5%, foram contemplados 12 bairros. A Tabela 3 apresenta a quantidade de resíduos coletado por bairro para garantir a representatividade da amostra.

Tabela 3 - Quantidade de RSU coletado nos bairros contemplados com o plano estatístico.

ZONA	BAIRRO	RESÍDUOS (Kg)
<i>Norte</i>	Conceição	271,13
	Nações	110,85
	Palmeira	448,66
<i>Sul</i>	Estação Velha	261,20
	Jardim Paulistano	632,84
	São José	311,41
	Velame	475,90
<i>Leste</i>	José Pinheiro	1.270,24
	Nova Brasília	739,97
<i>Oeste</i>	Dinamérica	431,95
	Malvinas	3.052,04
	Quarenta	393,87

A coleta nos bairros foi realizada de maneira especial em caminhão com caçamba aberta, sendo efetuada a pesagem imediata dos resíduos de acordo com a quantidade especificada para cada bairro, quantidade que foi previamente estabelecida por meio de cálculos estatísticos, de acordo com a população por bairro (Figura 13A).

Quando o caminhão atingia sua capacidade de volume e carga, ele era encaminhado para Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), onde os resíduos eram descarregados, e o caminhão retornava ao seu trajeto pelas ruas da cidade (Figura 13B). Esse processo foi repetido até que fosse atingido o total de 8,4 toneladas de resíduos coletados.

Figura 13 - A= Equipe de pesquisa pesando o resíduos coletados nos bairros; B= Resíduos sendo descarregados nas dependências da UFCG, setor C.



3.2.3 Preparação da amostra de RSU

Para a amostragem utilizou-se o procedimento recomendado pela norma NBR 10007 (ABNT, 2004) - Amostragem de Resíduos. Cujas obtenções significativas para os resíduos foram realizadas de acordo com as seguintes etapas (Figura 14):

- 1) Descarregamento dos resíduos do caminhão.
- 2) Abertura das sacolas plásticas, que inviabilizam o acesso aos resíduos.
- 3) Homogeneização dos resíduos com auxílio de uma enchedeira.

- 4) Após homogeneização dos resíduos, iniciou-se o seu quarteamento de acordo com Rocha (2003), que consiste em dividir a grande massa de RSU em quatro porções (pilhas ou montes) de resíduos.
- 5) Das quatro pilhas de resíduos geradas, duas foram descartadas e duas homogeneizadas, formando uma única pilha resultante das pilhas de lados opostos.
- 6) Após o procedimento de homogeneização e quarteamento, foram retirados da pilha resultante amostras para a caracterização física e geomecânica dos RSU.
- 7) Ao final, os resíduos restantes foram pesados e depositados no interior da célula experimental.

Figura 14 - A= Descarregamento dos RSU; B= Abertura de sacolas; C= Homogeneização; D=Quarteamento e descarte de pilhas; E= encaminhamento para composição e caracterização dos resíduos e F= pesagem para enchimento.

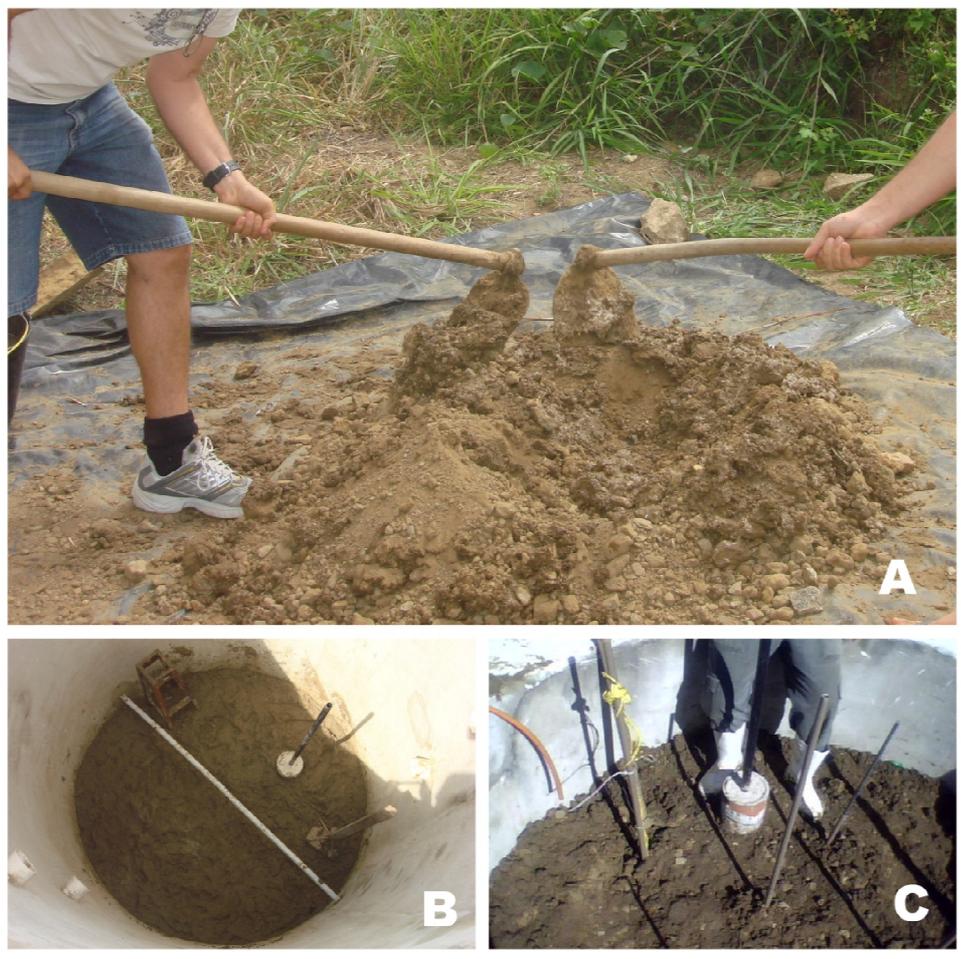


3.3 CAMADAS IMPERMEABILIZANTES

A impermeabilização de base e cobertura é de grande importância na construção do aterro, suas corretas execuções, somadas a uma boa seleção do solo resultam em um projeto que dificilmente causará quaisquer impactos ambientais (RIBEIRO, 2012).

Para a impermeabilização da base e cobertura da Célula Experimental utilizou-se uma camada de solo com altura de 0,20m e 0,15m, respectivamente, com características de impermeabilidade, compactado em sua umidade ótima e densidade máxima, com soquete manual (Figura 15).

Figura 15 - A= Execução das camadas impermeabilizantes com umidade ótima; B= Camada de base da Célula experimental e C= Compactação da camada de cobertura.



As camadas impermeabilizantes de um aterro tem a função de impedir o fluxo e a percolação de contaminantes, para o lençol freático. De acordo com Franceschet *et al.* (2005)

a contaminação de águas subterrâneas pode ser evitada através de uma adequada impermeabilização, utilizando-se solos de baixa permeabilidade, além do controle tecnológico em campo.

Para encontrar um solo que apresentasse as características citadas, foram realizados vários ensaios geotécnicos de acordo com as normas especificadas no Quadro 6.

Quadro 6 - Ensaios Geotécnicos e suas respectivas normas de referência.

ENSAIO	NORMA TÉCNICA
Preparação das Amostras e Determinação do Teor de Umidade	NBR 6457/86
Determinação da Massa Específica dos grãos	NBR 6508/84
Ensaio de Granulometria	NBR 7181/84
Determinação do Limite de Plasticidade	NBR 7180/84
Determinação do Limite de Liquidez	NBR 6459/84
Ensaio de Compactação	NBR 7182/86
Permeabilidade à carga constante	NBR13292/95
Permeabilidade à carga variável	NBR14545/00
Densidade <i>in situ</i>	NBR 7185/86

O solo utilizado nesta pesquisa foi aquele que apresentou condições adequadas para uso em aterros de resíduos sólidos. Tal solo foi encontrada em Boa Vista/PB, município à 42,5 Km de Campina Grande, pertencentes a mesma microrregião.

3.4 PREENCHIMENTO DA CÉLULA EXPERIMENTAL DE RSU

A Célula Experimental foi construída, instrumentada e preparada com uma camada de base recoberta por brita, para receber os resíduos de Campina Grande, segundo a metodologia de amostragem apresentada no item 4.2.

A pilha de resíduos destinada ao enchimento foi novamente homogeneizada pelo trator enchedeira, e seguiu para pesagem. Os resíduos foram colocados em baldes plásticos, de peso e volume conhecidos, que após a pesagem eram elevados, com o auxílio de uma máquina enchedeira, até a borda da Célula Experimental. Em seguida, os resíduos foram

cuidadosamente despejados e acomodados no interior da estrutura, para não causar nenhum tipo de dano a instrumentação instalada. Por fim, as camadas de resíduos inseridas foram compactada com soquete manual, e todo o processo foi repetido até que os RSU atingissem a altura de 3,2m (FIGURA 16).

Ao final, os resíduos foram recobertos com a camada impermeabilizante de cobertura, cujo peso resultou em uma deformação de aproximadamente 0,1m.

Figura 16 - A= Homogeneização dos RSU; B = Pesagem dos resíduos a serem acondicionados; C = RSU levado até a borda da Célula Experimental; D = Acomodação e compactação dos resíduos.



O momento do preenchimento da Célula Experimental é o marco inicial do reconhecimento e monitoramento do resíduos ao longo do tempo. Simultaneamente ao enchimento, foi realizada a caracterização física dos resíduos.

3.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS RESÍDUOS

3.5.1 Composição Gravimétrica e Volumétrica

A partir da porção de RSU destinada a caracterização física, pela amostragem apresentada no item 4.2, pôde-se realizar a composição gravimétrica e volumétrica com base na metodologia descrita por Catapreta & Simões (2008), Mariano et. al. (2007) e Rocha & Lang (2003).

Utilizando-se nove recipientes plásticos, com capacidade de aproximadamente 65 litros, foram retiradas amostras da pilha de RSU resultante do quarteamento, das laterais da base, do centro e do topo da pilha de resíduos. Este material foi pesado, resultando em aproximadamente 215 kg de resíduos, em seguida foi disposto em local previamente preparado com lona plástica para a caracterização gravimétrica e volumétrica dos resíduos soltos e compactados (Figura 17).

Figura 17 - A= Locais de retiradas da amostra; B= Resíduos para composição e C=Pesagem do material.



Em seguida realizou-se a triagem e pesagem dos resíduos (Figura 18), sua separação e classificação foi realizada segundo as subclasses de: plásticos, metal, vidro, compósitos, têxteis sanitários, papel e papelão, matéria orgânica e outros, definindo assim, a composição gravimétrica.

Figura 18 - A = Triagem dos Resíduos; B = Separação subclasses e C = Pesagem para gravimetria.



Após o procedimento da composição gravimétrica, realizou-se a composição volumétrica com o mesmo material separado e classificado pela gravimetria, onde foram feitas leituras de volumes de resíduos soltos, através das medidas de diâmetros e altura ocupados pelos resíduos. Em seguida, os resíduos foram compactados estaticamente, simulando a compactação ocorrida no interior da Célula Experimental, com o auxílio de um soquete de peso igual a 49 kg, obtendo-se a composição volumétrica dos resíduos compactados (Figura 19).

Esse peso compactador foi aplicado três vezes sobre a amostra de resíduos, respeitando o tempo cronometrado, 30 segundos de aplicação da carga sobre a amostra e 10 segundos de suspensão do soquete.

Figura 19 - A= Medição de altura e diâmetro ocupado pelos resíduos; B= Pesagem do soquete e C= Aplicação do carregamento.



3.5.2 Granulometria dos RSU

A determinação da granulometria dos RSU baseou-se na adaptação da NRB 7181 (ABNT, 1984), que descreve o ensaio de granulometria para solos. Neste ensaio, utilizou-se as contribuições de Alcântara (2007) para classificar a fração fina de acordo com a metodologia de REMECOM (Réseau Européen de Mesures Pour la Caractérisation des Ordures Ménagère) e Defra (2004) que reconhece como finos a quantidade de material que passa na peneira de espessura igual à 20 mm.

A preparação da amostra de RSU para o ensaio de granulometria foi obtida a partir da pilha de resíduos destinada a caracterização física, onde retirou-se dois baldes (com capacidade de 65L) para secagem ao ar livre. Após o período de secagem, os resíduos foram homogeneizados e depois separados em quatro pilhas iguais. Posteriormente, duas pilhas

foram descartadas e duas pilhas foram novamente homogêneas. Da pilha final homogênea, foi retirado 10kg para o ensaio de granulometria (Figura 20).

Figura 20 - A= Secagem dos resíduos ao ar; B = Quarteamento e descarte de duas pilhas de resíduos; C= Homogeneização manual das duas pilhas restantes e D= Pesagem de 10Kg de amostra para ser levada ao laboratório.



No laboratório, realizou-se ensaios granulométricos para a porção grossa e para porção fina dos resíduos. Para o peneiramento da parte grossa foram utilizadas cinco peneiras, sendo uma peneira de forma circular e quatro retangulares de área aproximadamente $0,4\text{m}^2$, todas com malhas metálicas. Na primeira etapa, o processo de separação foi manual com auxílio de uma peneira de circular de 76,2 mm (diâmetro da malha). Em seguida, com ajuda do agitador mecânico, iniciou-se o peneiramento da segunda etapa utilizando peneiras retangulares de 50,8 mm até 19,1 mm. Por fim, o material retido em cada peneira foi levado para a estufa a 60°C durante 48 horas (Figura 21).

Figura 21 - A= Peneira Circular #76,2 mm; B= Série de peneiras retangulares; C= Resíduos submetidos ao peneiramento; D= Peneiramento sob agitação mecânica e E= Resíduos encaminhados para a estufa.



Desta maneira, os resultados obtidos a partir das massas retidas em cada peneira foram calculados a partir das Equações 13 e 14:

$$PR = \frac{MR}{MTS} \times 100 \quad \text{Eq. 13}$$

$$PP = 100 - PR \quad \text{Eq. 14}$$

Onde, *PR* - Porcentagem retida no peneiramento grosso;

MR - Massa retida;

MTS - Massa total seca;

PP - Porcentagem que passa no peneiramento grosso.

Para o peneiramento da fração fina, foram utilizadas peneiras circulares com malhas que variaram de 9,5mm a 0,072mm (Figura 3). Nesta etapa houve a lavagem da amostra na peneira 0,072mm como exige a metodologia NRB 7181 (ABNT, 1984). Sendo assim, foi pesado 1kg da amostra passante na peneira de 19,1mm e, por um processo manual, realizou-se o peneiramento dos resíduos. O material retido em cada peneira foi acondicionado em cápsulas (previamente taradas) e, em seguida, pesadas.

Figura 22 - A= amostra passante na peneira #19,1mm; B=Série de peneiras circulares;
C=Peneiramento da fração fina e D= Capsula



A porcentagem de finos que passou em cada peneira foi calculada através das Equações 15 e 16:

$$Pr = \frac{Mr}{MTSPF} \times 100 \quad \text{Eq. 15}$$

$$Pp = (100 - Pr) \times N \quad \text{Eq. 16}$$

Onde, Pr - Porcentagem retida no peneiramento fino;

Mr - Massa retida;

MTSPF - Massa total seca da parte fina;

Pp - Porcentagem que passa no peneiramento fino;

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

3.5.3 Compactação dos resíduos aterrados

Esta foi realizada tomando como base as recomendações da NBR 7182 (ABNT 1986), que rege a compactação para solo. A partir de tal metodologia fez-se uma tentativa de adaptação para RSU aplicando a energia do *proctor* normal dada em Kg.cm/cm³, para encontrar a relação da massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótima dos resíduos.

A amostra de resíduos utilizada neste ensaio foi retirada da mesma pilha final homogeneizada descrita no item 4.5.2 e apresentada na Figura 20, porém para compactação dos resíduos foram pesados apenas 7kg do material.

A primeira adaptação da norma, foi a utilização do um molde do cilindro grande, padrão CBR, com volume de 4098,9 cm³, soquete grande com peso de 4640,0g caindo de uma altura de 46,5 centímetros, apesar da energia utilizada no ensaio ser a *proctor* normal foi necessário utilizar o cilindro maior para melhor acomodar os resíduos, que apresentam composição e tamanho dos grãos bem diferentes do solo, mesmo tendo sido utilizados para o ensaio apenas os RSU passantes na peneira de 19 mm.

Inicialmente adiciona-se uma quantidade inexata de água à amostra de RSU até se verificar certa consistência. Depois de completada a homogeneização (água + RSU), a compactação foi realizada com 6% de água no primeiro ponto e 4% nos outros pontos. Em cada ponto, com auxílio do molde de cilindro grande e soquete lançado golpes a 0,465m de altura, foram distribuídas 5 camadas iguais e, em cada camada, aplicou-se 12 golpes distribuídos uniformemente com energia do *Proctor Normal*. Para cada ponto, eram pesados o cilindro pós compactado e retiradas três amostras para determinação da umidade. O procedimento foi repetido 7 vezes, até que fosse possível formar a curva de compactação dos RSU de Campina Grande/PB (Figura 23).

Figura 23 - A= Amostras passantes na peneira #19mm; B= Acréscimo da porcentagem adequada de água; C= Golpes da compactação; D= Pesagem do cilindro compactado; E=Desmolde de um do pontos do ensaio e F= pesagem para obter a umidade.



Deste modo, pode-se construir a curva de compactação e encontrar o grau de compactação através da Equação 17.

$$GC = \frac{\gamma_d^{campo}}{\gamma_d^{máximo}} \times 100 \quad \text{Eq. 17}$$

Onde,

GC = Grau de Compactação;

γ_d^{campo} = Massa específica do campo (lisímetro);

$\gamma_d^{máximo}$ = Massa específica seca máxima (laboratório);

3.5.4 Massa Específica e Umidade dos Resíduos

A massa específica aparente solta com umidade natural foi determinada a partir da pesagem dos resíduos destinados a composição gravimétrica e volumétrica, e do volume conhecido dos baldes plásticos também utilizados na composição. Os recipientes foram preenchidos com o auxílio de uma pá manual, sem compactação dos resíduos, até a borda. O ensaio seguiu recomendações de D'Almeida & Vilhena (2000) e CETESB (1990). No total foram preenchidos 13 recipientes, sendo a massa e o volume dos resíduos o resultado final obtido pelo somatório das treze determinações.

A massa específica aparente solta da amostra foi calculada pela relação entre a massa e o seu volume de acordo com a Equação 18.

$$\rho = \frac{M - M_r}{V} \quad \text{Eq. 18}$$

Onde: ρ = massa específica aparente solta (kg/m^3);

M = massa de resíduos (kg);

M_r = massa do recipiente (kg);

V = volume do recipiente (m^3).

Para a determinação da massa específica do resíduo compactado levou-se em consideração o peso total dos resíduos utilizados no preenchimento da Célula Experimental, e a sua capacidade volumétrica de armazenamento.

Já o teor de umidade foi determinado pelo método de base úmida, segundo Manassero *et al.* (1996) o mais comumente utilizado em resíduos sólidos. Onde, uma quantidade representativa da amostra de resíduo sólido foi pesada e em seguida levada a uma estufa entre 60 e 65°C por 24 horas (Figura 24).

Após resfriamento as amostras foram pesadas em uma balança digital. Assim a água contida na amostra foi dada pelo peso perdido durante o processo, sendo o teor de umidade em cada amostra determinado pela Equação 2.

$$w = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad \text{Eq. 19}$$

Onde, w = Teor de Umidade (%);

P_i = peso inicial (g);

P_f = peso final (g).

Figura 24 - A= Pesagem das cápsulas com resíduos e B= Resíduos encaminhados para estufa.



A umidade dos RSU foi monitorada ao longo do tempo de acondicionamento, e em função de sua profundidade.

3.6 MONITORAMENTO DOS RECALQUES *IN SITU*

Após a execução das etapas iniciais de enchimento e caracterização dos resíduos, a Célula Experimental passou a ser monitorada, a partir de ensaios laboratoriais e *in Situ*, para controle da evolução dos parâmetros mecânicos, físicos, físico-químicos e microbiológicos dos RSU.

A Célula de resíduos foi monitorada no período de setembro de 2011 a setembro de 2013, onde nos primeiros meses o controle dos recalques eram realizados semanalmente, após algum tempo foi verificada a proximidade entre os dados e as medições passaram a ser quinzenais, e por fim, nos últimos meses os recalques foram aferidos mensalmente.

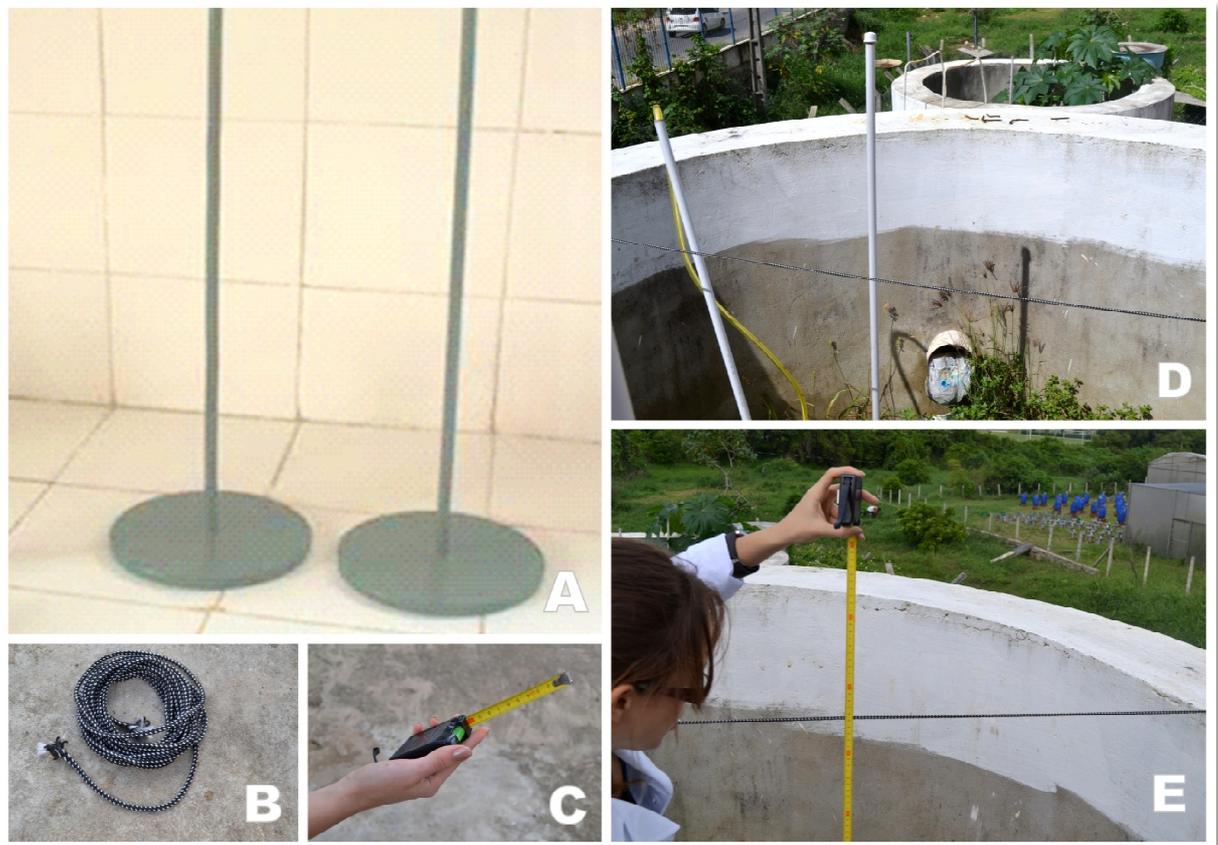
As deformações verticais ocorridas no interior da Célula Experimental, foi obtida por duas metodologias uma aplicada a recalques superficiais e a outra a recalques em profundidade.

3.6.1 Medições de recalque superficial

A metodologia empregada para a obtenção dos recalques superficiais, foi realizada de acordo com Leite (2008), onde mediu-se os deslocamentos verticais das placas metálicas, com 15cm de diâmetro, revestidas com película anticorrosiva e no centro uma haste de aproximadamente 60cm confeccionadas na instrumentação. As 2 placas foram instaladas após o enchimento da célula experimental, ficando localizadas sobre a última de resíduos e abaixo da camada de cobertura de solo.

As medições dos recalques superficiais consistiu em esticar uma corda horizontalmente, fixando-a na borda da Célula Experimental, para em seguida com um auxílio de uma trena, realizar a medição da distância vertical entre a parte inferior da corda até o início das hastes das placas (Figura 25).

Figura 25 - A= Placas de recalque superficial; B= Corda utilizada para nível de referência;
C=Trena utilizada na medição; D= Corda de referência fixada nas bordas da Célula Experimental e E= Aferição dos deslocamentos verticais das placas.



3.6.2 Medições de recalque em profundidade

A metodologia aplicada para medição de recalque em profundidade foi realizada segundo adaptações de Melo (2011), onde as placas de recalques confeccionadas na instrumentação com materiais metálicos de 20cm o diâmetro, revestidas com uma película anticorrosiva, contendo uma abertura central de aproximadamente 5cm acoplado com um imã, permitindo a passagem do tubo de PVC (Figura 26A). Foram instaladas, durante o enchimento da célula experimental, seis placas circulares em alturas previamente estabelecidas.

As leituras dos recalques em profundidades foram realizadas a partir da introdução de um guia com sensor magnético na ponta, revestido com mangueira graduada, no interior do tubo de PVC instrumentado no centro da Célula Experimental, com intuito de identificar a localização da placa magnética. Tal sensor foi acoplado a um ohmímetro digital, que exibia uma oscilação negativa quando aproximava-se das placas metálicas (Figura 26).

Figura 26 - A= Placa de recalque em profundidade; B= Mangueira graduada com sensor na ponta; C= Ohmímetro; D=Inserção do sensor magnético no tubo PVC e E=Identificação da profundidade da placa.



Desta maneira, marcava-se na mangueira o momento da oscilação, retirando-a em seguida do tubo de PVC e com um auxílio de uma trena, mediu a distância exata em que o sensor identificou a placa.

3.7 AJUSTE DOS MODELOS DE RECALQUE A PARTIR DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS COLETADOS

Para a verificação do melhor ajuste dos modelos de recalque associados a biodegradação será usado o critério iterativo de GAUSS-NEWTON e os parâmetros estatísticos: soma dos quadrados dos resíduos (SQR), coeficiente de determinação (R^2) e também o critério de Akaike (AIC).

3.7.1 Teste dos modelos pelo método iterativo de Gauss-Newton

Após a realização de todos os procedimentos experimentais da pesquisa, fez-se necessário a análise exploratória dos dados de recalques coletados. Estes dados foram ajustados interativamente pelo método Gauss-Newton, a quatro modelos de previsão de recalques consagrados na literatura.

Os modelos escolhidos para o ajuste, foram o modelo clássico de Sowers (1973), o modelo logarítmico de Yen & Scalon (1975), o modelo Hiperbólico de Ling *et al.* (1998) e o modelo que confere características biológicas proposto por Simões (2000).

O ajustes dos dados aos modelos foram realizados com o uso de uma ferramenta estatística, o *software* STATISTICA® (Versão 8.0), programa computacional que dispõe de excelentes módulos de ajustamento das distribuições e um vasto conjunto de ferramentas para gráficos.

O ajuste do modelo gerado pelo programa, disponibiliza uma curva ajustada, o coeficiente de determinação (R^2), os *p-valores*, os dados preditos, os resíduos gerados na regressão, entre outros parâmetros relevantes para testar qual dos modelos oferece melhor a resposta aos dados coletados.

3.7.2 Coeficiente de determinação (R^2), Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR) e Critério de Akaike (AIC)

A partir dos resíduos gerados no ajuste dos modelos de previsão de recalque, pela diferença entre os dados observados e os dados esperados, foi possível calcular os parâmetros estatísticos R^2 , SQR e AIC, de acordo com o cálculo das Equações 10, 11 e 12, respectivamente.

O modelo que apresentar as melhores respostas nos três teste, é o modelo que melhor se adéqua, e melhor representa os dados da pesquisa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

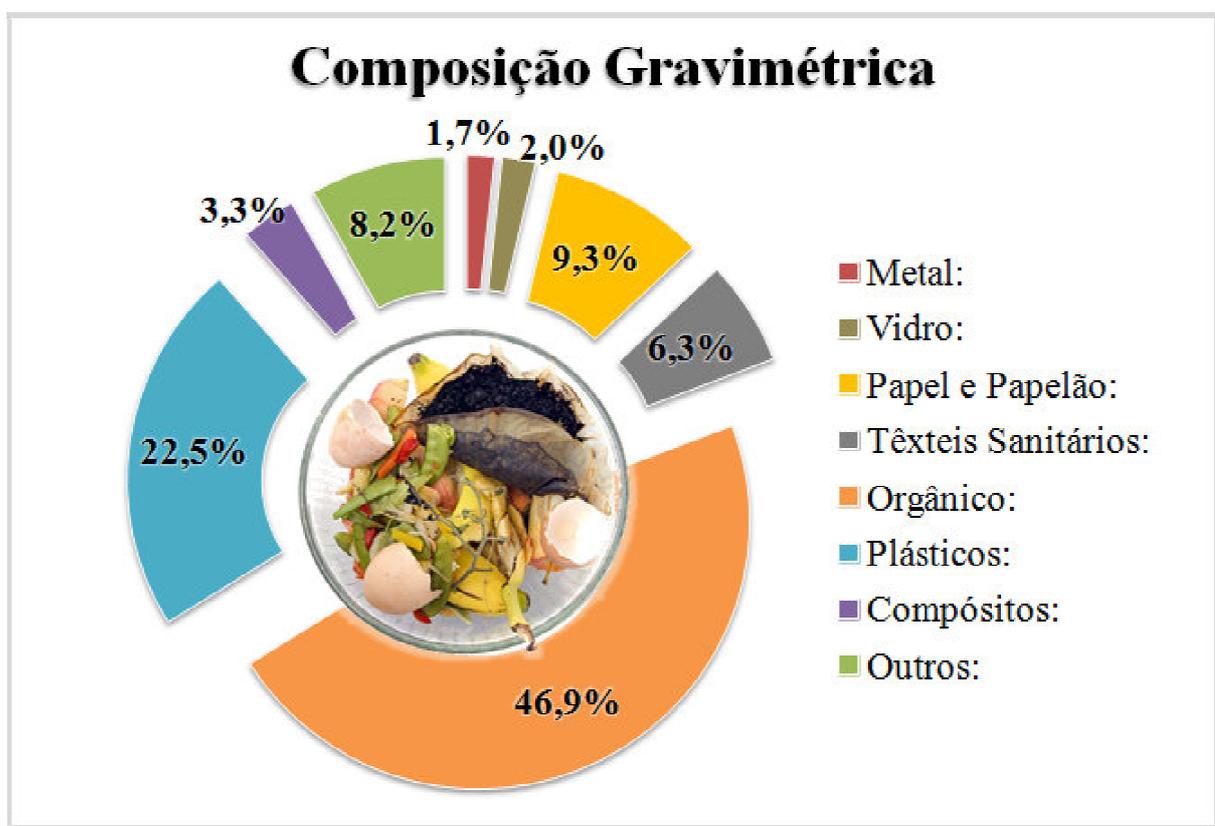
Para entender a ocorrência dos recalques em maciços sanitários, é preciso compreender, primeiramente, as características dos resíduos sólidos urbanos. Este estudo avaliou como essas propriedades influenciam a degradação dos resíduos dispostos na célula experimental, e conseqüentemente a redução de sua massa ao longo do tempo.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS RESÍDUOS

4.1.1 Composição Gravimétrica e Volumétrica

Na composição gravimétrica de Campina Grande/PB destacou-se a presença predominante de materiais putrescíveis, conforme Figura 27.

Figura 27 - Composição Gravimétrica dos resíduos de Campina Grande/PB.



Encontrou-se 46,9% de matéria orgânica, valor que aproxima-se da média nacional, de 51,4% (ABRELPE, 2012) e que caracteriza bem a geração de materiais biodegradáveis esperada para cidades de países em desenvolvimento, como o Brasil.

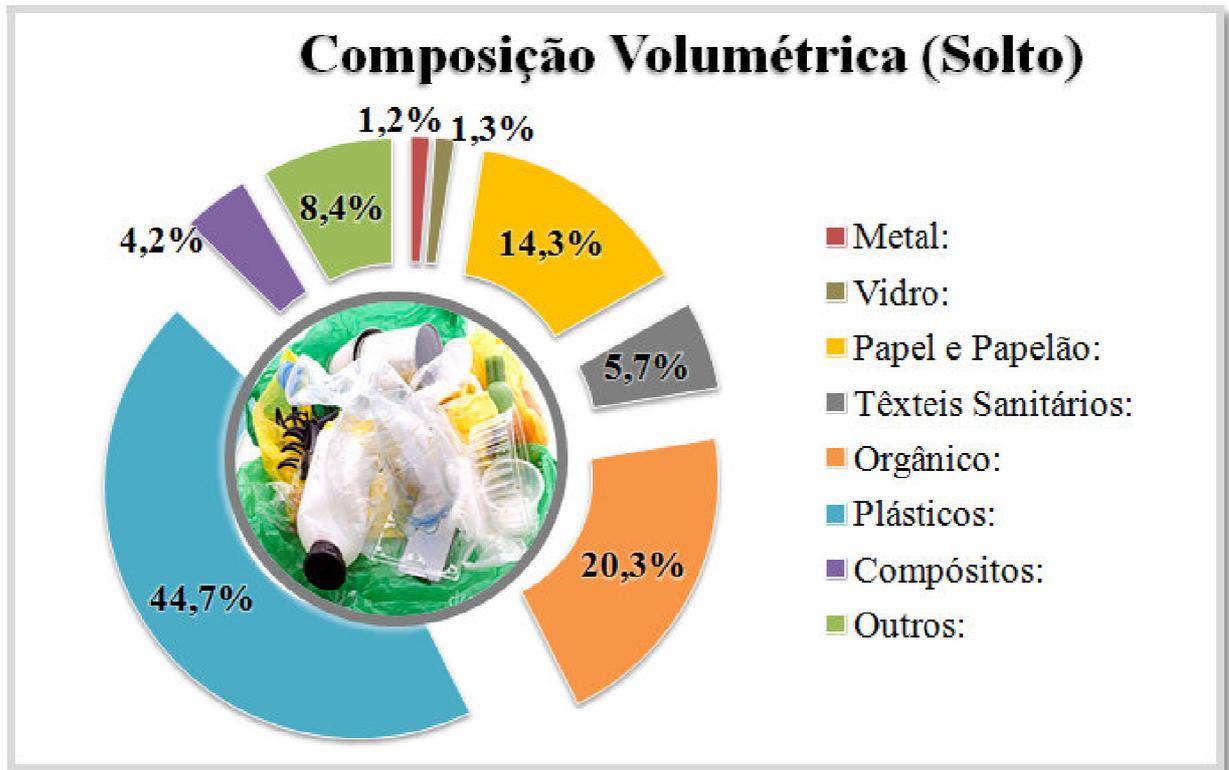
Essa porcentagem foi significativamente inferior a quantidade de matéria orgânica encontrada por Leite (2008), Garcez (2009), Melo (2011) e Vieira Neto (2012) que obtiveram valores de orgânicos na faixa entre 65-70%, para estudos de composição utilizando-se três bairros de Campina Grande/PB, com classes sociais diferentes. A discrepância entre essas composições, pode ter acontecido em decorrência de dois fatores, primeiramente devido ao aprimoramento da metodologia aplicada, através do planejamento estatístico para amostragem dos RSU da cidade, e também devido a um possível aumento no consumo de materiais industrializados, que podem ter elevado a quantidade de recicláveis nos resíduos descartados.

Quanto maior a quantidade de um determinado componente, tanto mais as características gerais do maciço se assemelharão as características desse componente (BOSCOV, 2008). Portanto, o alto percentual de matéria orgânica nos resíduos acondicionados na Célula Experimental (Figura 27), pode indicar elevado percentual de deformação da massa de RSU. Uma vez que, a presença de materiais putrescíveis favorece a aceleração da degradação dos resíduos, resultando em grandes recalques.

Esta realidade confronta-se com a dificuldade de decomposição encontrada pelos resíduos quando acompanhados dos demais materiais que o compõe. Desta forma, o percentual de componentes considerados recicláveis, como plástico (22,5%), papéis e papelões (9,3%) tiveram valores bastante significativos, que somados as pequenas porcentagens de compósitos (3,3%), vidros (2,0%) e metais (1,7%), podem ser responsáveis por retardar o processo degradativo, prolongando o tempo necessário para que o maciço sanitário atinja seu recalque final.

No caso específico dos plásticos, a porcentagem em peso foi de apenas 22,5%, mas em termos de volume (Figura 28) esta porcentagem praticamente dobra, e o componente passa a ocupar 44,7% da quantidade total dos resíduos. Observando este e os demais materiais recicláveis presentes na Célula Experimental, constatou-se que em termos de volume a estrutura é ocupada por aproximadamente 80% de materiais de difícil degradação, por outro lado, a maioria deles apresenta boas características de deformabilidade.

Figura 28 - Composição volumétrica dos RSU de Campina Grande/PB.



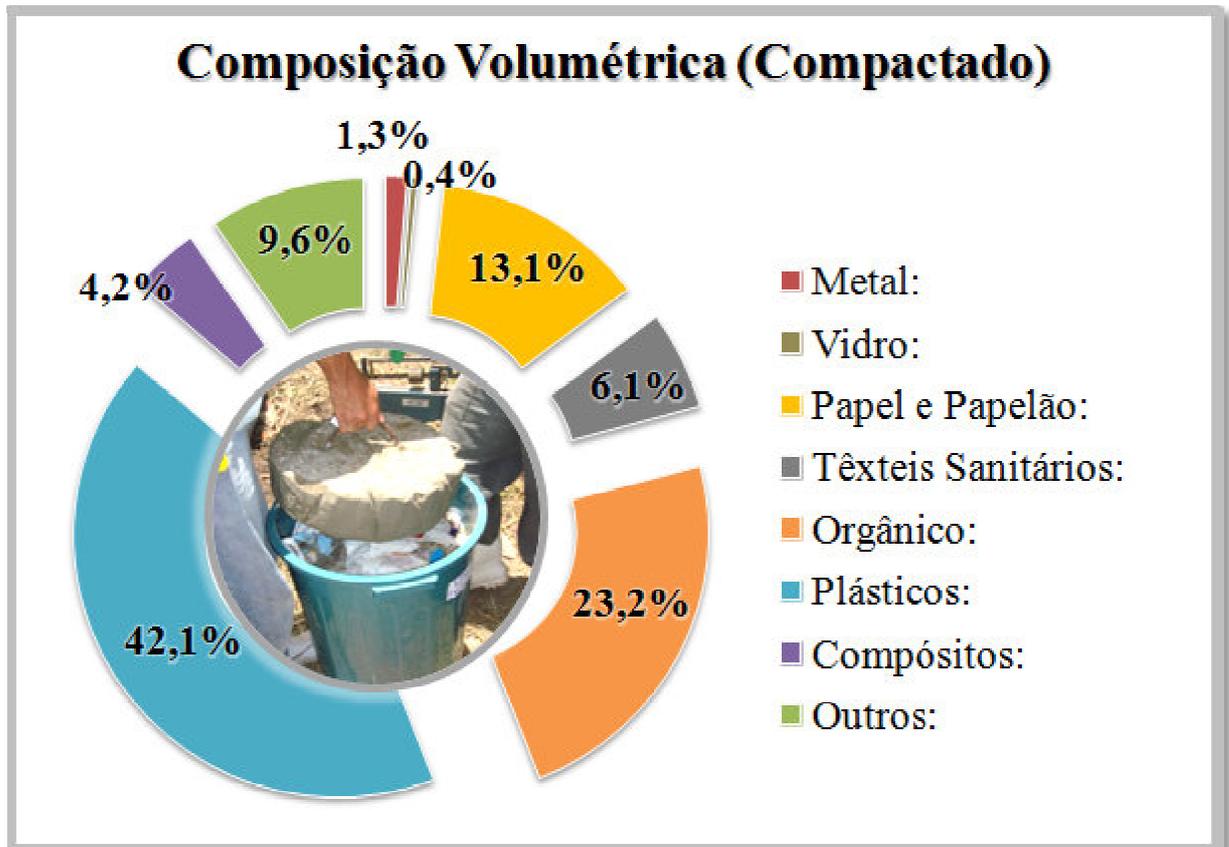
Pereira *et.al.* (2010) afirma que o alto teor de plásticos pode ser indicador de que a triagem desses materiais não vem ocorrendo nos domicílios através de programas de coleta seletiva.

Pode-se dizer que esses dados também são importantes para direcionar a gestão de resíduos da cidade, por apresentarem elevado potencial de reciclagem. A compressibilidade, e consequentemente a vida útil de um aterro de Resíduos Sólidos pode ser aumentada, se dados como esses passarem pelos responsáveis pela gestão de RSU, ou seja, por uma coleta seletiva adequada e com abrangência para toda a cidade.

Segundo Catapreta & Simões (2008), a grande quantidade de plásticos e papéis pode ser prejudicial do ponto de vista operacional para aterros sanitários, pois estes agem como um “colchão” passando a falsa impressão de compactação. Fator confirmado, através da Figura 29, onde observa-se a tendência de redução em porcentagem dos RSU quando submetidos a um carregamento.

Esses materiais, apesar de serem capazes de diminuir a degradabilidade dos RSU devido a formação de vazios, ou bolsões, também podem aumentar a resistência a deformação, por constituírem uma matriz estrutural de reforço.

Figura 29 - Composição dos volumes de RSU compactados estaticamente.



De acordo com esses resultados, os têxteis sanitários, compósitos e outros, praticamente não sofrem deformação quando submetidos a uma determinada carga, fator que influencia diretamente a compactação e os recalques dos resíduos.

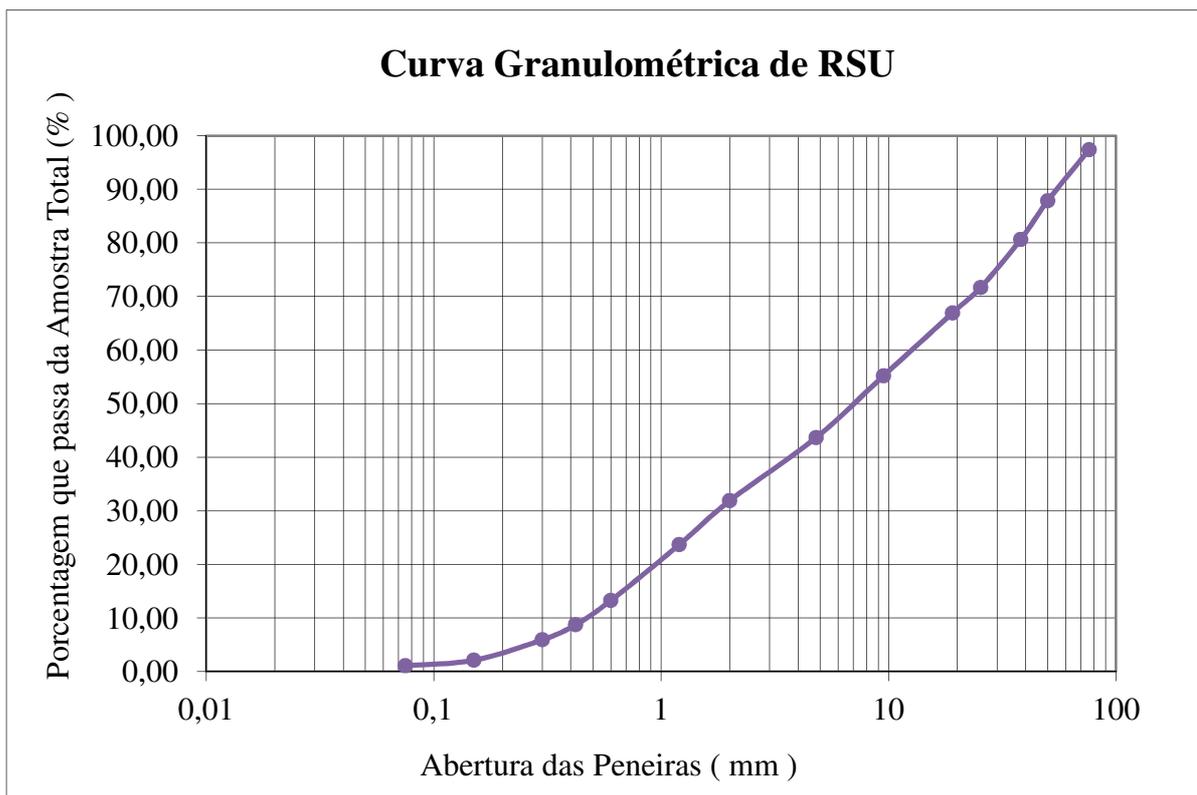
Observa-se ainda, que o volume do metal e do vidro, encontram-se em menor escala na destinação final dos resíduos de Campina Grande. Há possibilidades que tais materiais tenham passado por algum tipo de interceptação no processo de descarte, uma vez que eles são materiais reconhecidamente rentáveis para a indústria da reciclagem.

4.1.2 Granulometria dos RSU

A Figura 30 apresenta a curva granulométrica obtida pelo método do peneiramento da amostra inicial dos RSU de Campina Grande-PB. Analisando os resultados, observou-se que o teor de finos foi de 66,94% o que representa um percentual considerável em termos de condições favoráveis para degradação dos resíduos e desenvolvimento de recalques, pois Alcântara (2007) afirma que quanto menor o tamanho das partículas dos resíduos sólidos,

maior a área superficial específica e maior o contato entre os microrganismos, podendo acelerar o processo de biodegradação. Embora se tenha alcançado quase 67% do teor de finos, isso não implica que haverá realmente o favorecimento de uma boa degradação, pois esse fator também dependerá do tipo de material a ser degradado.

Figura 30 - Curva Granulométrica dos RSU que compõem a Célula Experimental.



Nascimento (2007) obteve uma faixa da fração de finos semelhante, compreendida entre 40% a 60% dos resíduos. Porém, em seu trabalho o material fibroso como por exemplo: têxteis e plásticos moles, não foram incluídos. Já para esta pesquisa não houve qualquer segregação de resíduos, e nas malhas de diâmetro máximo foram encontrados grandes concentrações de plásticos moles, folhas secas, dentre outros materiais de grandes dimensões, que apesar de serem representativos quanto ao volume, são materiais de massa específica reduzida, o que justifica a sua baixa porcentagem na curva granulométrica (Figura 30).

A presença da fração grossa e fina foi observada devido à heterogeneidade intrínseca dos resíduos sólidos urbanos, sendo encontrados resíduos de diversos tipos de materiais com variados formatos e massas específicas. Portanto, pode-se perceber que à medida que o

diâmetro das malhas diminuíram, a densidade dos materiais aumentaram gradativamente, resultando em uma curva bem graduada.

A fração mais grossa do resíduo, representado pelos 2,6% dos RSU retidos na peneira de 76,2 mm, apesar de apresentarem menor peso, ocupam grande volume no interior da Célula Experimental, e são capazes de gerar muitos vazios, que favorecem os recalques devido acomodação das partícula ao longo do tempo.

A elevada porcentagem de materiais com granulometria inferiores a 1mm (20%) pode ser justificada pela presença de resíduos e de solos provenientes da varrição, assim como pela mistura com o solo da área onde os resíduos foram submetidos a homogeneização. Esses finos tem influencia no comportamento mecânico dos RSU favorecendo a resistência do maciço sanitário, pois tendem a ocupar os vazios existentes devido aos resíduos com grandes dimensões, quando submetidos a compactação.

A presença desses finos também pode favorecer a ocorrência dos recalque devido a biodegradação, a medida em que as partículas menores ocupam os vazios aumenta-se a superfície de contado entre os resíduos, este contato influencia a atividade dos microrganismos degradadores da matéria, transformando-a em líquidos e gases.

4.1.3 Compactação dos resíduos aterrados

Os resultados da compactação obtida em laboratório possibilitaram o calculo do grau de compactação, a partir das massas específicas apresentadas no Quadro 7, que alcançou o valor de aproximadamente 55,16%, expressando que a compactação em campo não se mostrou tão semelhante a ocorrida no laboratório.

Quadro 7 - Massa específica e teor de umidade obtidos em laboratório e *in situ*.

Laboratório	<i>Umidade Ótima (%)</i>	<i>Massa Específica seca máxima (ton/m³)</i>
	17,6	1,220
Célula Experimental	<i>Umidade Inicial (%)</i>	<i>Massa Específica do resíduo compactado (ton/m³)</i>
	56,5	0,673

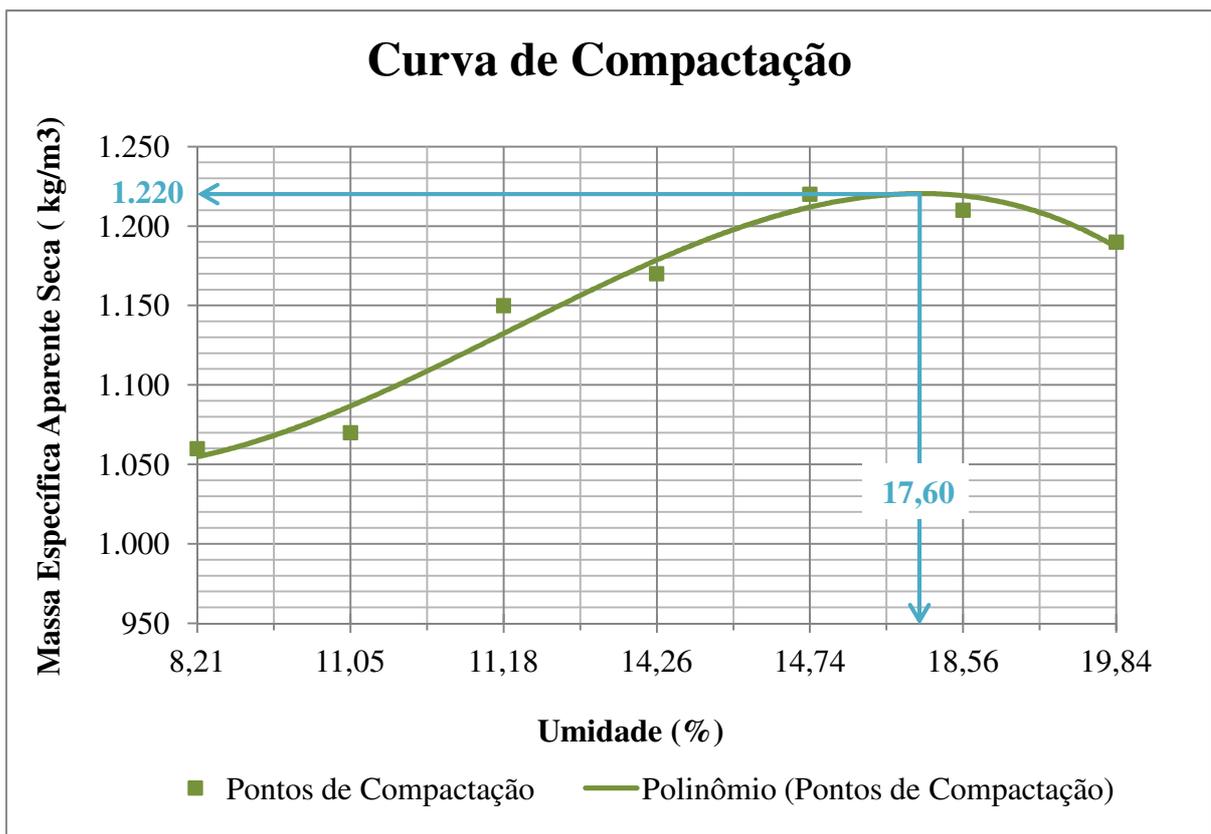
Observou-se que a energia aplicada durante o enchimento da Célula Experimental com resíduos, foi inferior a energia *proctor* alcançada em laboratório. Outro fator que exerceu

influência no grau da compactação, foi a umidade inicial dos resíduos, que mostrou-se bem acima do valor encontrado para umidade ótima, que poderia supostamente favorecer as condições ideais de estabilidade do aterro experimental.

Essa baixa umidade pode ser justificada pela metodologia de secagem ao ar recomendada pela NBR - 7182/86. Assim como, o valor elevado da massa específica encontrada em laboratório, pode ser explicado pelo fato de que a metodologia aplicada exigiu a utilização apenas de resíduos com granulometria inferiores 19 mm, que garantiram uma melhor compactação. Em campo, os resíduos acondicionados apresentaram dimensões maiores, e de pesos bem mais leves.

A massa específica máxima encontrada pelos ensaios laboratoriais foi de 1.220 kg/m^3 , para 17,60% de umidade ótima conforme curva de compactação apresentada na Figura 31.

Figura 31 - Curva de compactação característica dos RSU.



Os resultados apresentados assemelham-se com as condições ideais encontradas para garantir máxima resistência em alguns tipos de solos. Porém, devido a heterogeneidade de seus componentes e de seu comportamento, os resíduos destinados a célula experimental foram compactados em sua condição natural, onde a umidade encontrava-se acima da ótima e

com uma massa específica inferior a máxima, essas condições conferem uma certa instabilidade inicial ao aterro, indicando que ocorrerão recalques sucessivos ao longo do tempo.

Segundo Melo (2011) a umidade inicial dos RSU pode ocasionar esta instabilidade devido aos processos biológicos e mecânico que ocorrem no interior da massa de resíduos, e influenciar diretamente no aumento dos recalques.

No interior da Célula Experimental, a presença dos plásticos por serem maleáveis e leves dificultaram a compactação deixando-a com aspecto elástico, ou seja, não absorveram grandes quantidades de energia. No entanto, para o ensaio em laboratório retirou-se as maiores frações de plásticos, papelões, têxteis e outros do processo, o que resultou em uma elevada massa específica.

Alcântara (2007) realizou a compactação para dois tipos de resíduos, com texturas grossa e fina, onde os resultados para os resíduos de texturas grossa apresentaram maiores teores de plásticos e, conseqüentemente, elevada elasticidade e baixa massa específica, conforme a realidade encontrada nos resultados da compactação em campo desta pesquisa.

Se por um lado a presença elevada destes constituintes dificultaram a compactação dos RSU, por outro favoreceram a ocorrência de taxa elevadas dos recalques iniciais, principalmente devido ao carregamento. Portanto, o grau de compactação encontrado apesar de não garantir ótimas condições de estabilidade, indica a presença de vazios que proporcionaram ao longo do tempo recalques devido a fatores mecânicos e biodegradativos.

4.1.4 Massa específica dos RSU

De acordo com os resultados encontrados pela compactação dos RSU, observou-se a importância e a dificuldade de se obter a massa específica dos resíduos, por isso, a partir dos dados da gravimetria e volumetria foi possível descobrir a massa específica solta e compactada de cada componente, apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Massa específica dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campina Grande/PB.

	<i>Massa específica Solta (ρ_s) ton/m³</i>	<i>Massa específica compactada (ρ_{comp}) ton/m³</i>
Total :	0,267	0,673

Por Material:	<i>Massa específica Solta (ρ_s) ton/m³</i>	<i>Massa específica compactada (ρ_{comp}) ton/m³</i>
Metal	0,268	0,393
Vidro	0,315	1,490
Papel e Papelão	0,128	0,223
Têxteis Sanitários	0,218	0,326
Orgânico	0,456	0,636
Plásticos	0,099	0,168
Compósitos	0,151	0,246
Outros	0,192	0,270

A massa específica solta e compactada total dos resíduos estão de acordo com estudos anteriores (LEITE, 2008; MELO, 2011) para os resíduos de Campina Grande. Tais estudos afirmaram que a massa específica compactada em torno de 0,7 ton/m³ são valores compatíveis para o bom funcionamento mecânico de um aterro experimental.

Valores em torno de 0,3 ton/m³ são característicos de resíduo solto, em torno de 0,5 ton/m³ RSU no caminhão compactador e mais de 1 ton/m³ resíduos muito compactados no aterro (JUNQUEIRA, 2000). Esses valores também justificam as diferenças encontradas pela compactação em laboratório e *in situ*, onde a massa específica dos resíduos no interior da Célula Experimental corresponde a uma energia de compactação realizada manualmente.

Analisando os valores para cada componente, observa-se que todos aumentam sua massa específica quando submetidos a um carregamento. Porém, a massa específica do vidro aumenta em quase cinco vezes do seu valor inicial, isso se deve ao fato de que esse material não apresenta propriedade de deformabilidade, quando submetidos a algum carregamento tendem a quebrar sua estrutura original, transformando-se em pequenas partículas que ocupam menor espaço. Esse processo de quebra pode gerar vazios expressivos, que resultam em recalques bruscos.

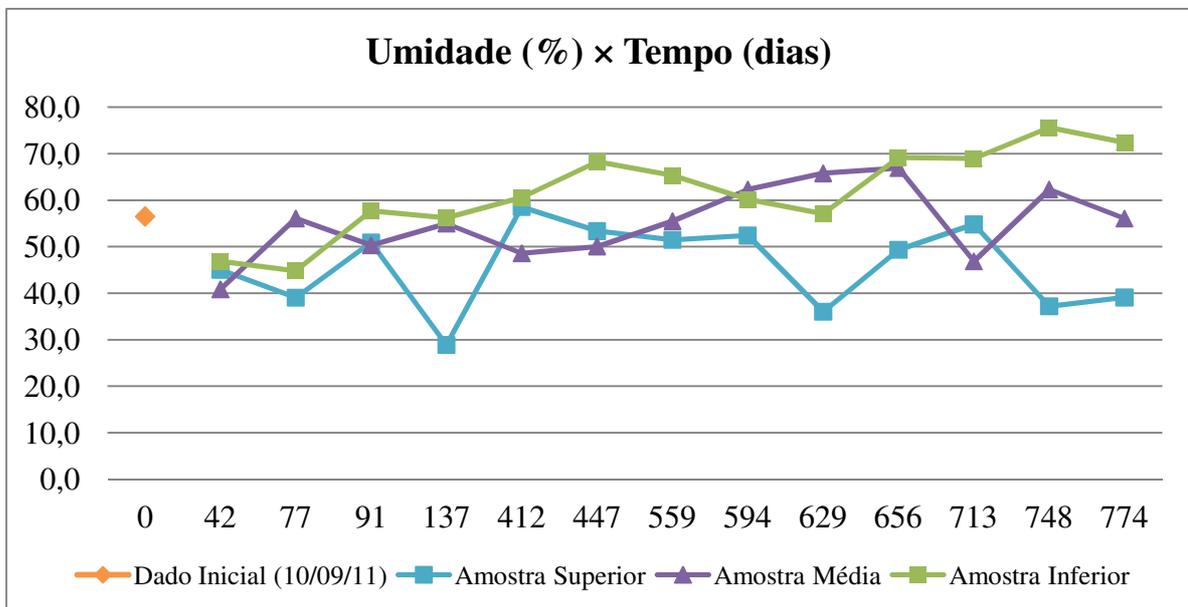
Dentre os componentes que apresentaram aumento discreto de suas massas específicas, destacam-se a matéria orgânica, os têxteis sanitários e outros, que apesar de da pouca deformação, quando submetidos aos carregamentos iniciais, tendem a reduzir o seu volume, e consequentemente aumentarem a sua massa específica, ao longo do tempo, devido principalmente a biodegradação, fator que pode afetar diretamente o aumento da ocorrência dos recalques.

4.1.5 Umidade dos Resíduos ao longo do tempo

Obter a umidade inicial dos RSU é muito importante para caracterizar o perfil do resíduo quanto a degradação, porém esta propriedade tende a modificar-se com o tempo. Essas mudanças serão refletidas no aumento dos recalques durante o período de monitoramento da Célula Experimental.

A umidade inicial dos resíduos de Campina Grande/PB, e sua evolução ao longo do tempo de aterramento pode ser observada na Figura 32.

Figura 32 - Evolução da umidade no interior da Célula Experimental de RSU.



Em geral, observa-se que o elevado teor de umidade inicial (56,5%) está associado a quantidade de matéria orgânica verificada na composição gravimétrica (Figura 27) que alcançou um valor de 46,9%. Isso indica que, conforme a literatura prevê, a umidade estará sempre relacionada a presença de orgânicos nos RSU.

O teor de umidade interfere diretamente no processo de decomposição dos resíduos, pois a umidade, associada a outros fatores como temperatura, composição dos resíduos, etc., estabelecem condições favoráveis ou desfavoráveis para a biodegradação destes resíduos.

Para entender o processo de biodegradação, que resultará nas deformações verticais ocorridas no interior da Célula Experimental, observou-se o comportamento da umidade em amostras de resíduos provenientes de três profundidades diferentes (Amostra Superior,

Amostra Média e Amostra inferior). Na Figura 32, são apresentados valores semelhantes à faixa considerada ideal para a decomposição, em todas as profundidades, que segundo alguns autores é de 40 à 60% (Bidone & Povinelli, 1999; Coumoulos *et al.*, 1995) durante os primeiros dias de monitoramento e até o 412º dia.

A partir deste período foi possível verificar uma diferenciação entre os níveis de profundidade. A amostra superior, apesar de apresentar picos de instabilidade, devido a proximidade com o ambiente externo, demonstra ao longo do tempo, a tendência de reduzir seus teores de umidade, atingindo na fase final umidades abaixo de 40%. Essa redução é previsível, uma vez que a massa de resíduos é degradada, o seu volume e a quantidade de matéria orgânica é reduzida, ocasionando o decréscimo de umidade. Além disso, a proximidade com a camada de cobertura favorece interações com o meio externo, tais como a entrada de ar e a evaporação dos líquidos, devido a longos períodos de estiagem característicos da região.

Na amostra de profundidade média, observou-se a permanência na faixa favorável a decomposição (40-60%) durante todo o período de monitoramento. Já na amostra de profundidade inferior, verificou-se a partir do 447º dia, mesmo com oscilações, a tendência de elevação do seus teores, comparados com as demais profundidades, atingindo na fase final umidades acima de 70%. Esta característica é justificada pelo acúmulo de líquidos na parte inferior da célula experimental, que são resultantes da percolação do lixiviado produzido na degradação da própria camada e de camadas superiores.

Esses elevados teores de umidade e aumento da lixiviação, também são favorecidos em determinados períodos do ano pelos valores de precipitação, que em Campina Grande alcançam a média anual de 700mm (MELO, 2011). Essas condições permitem um deslocamento facilitado dos nutrientes no interior da massa de resíduos, possibilitando o desenvolvimento dos microrganismos que vão transformar a matéria, e gerar recalques sucessivos ao longo do tempo.

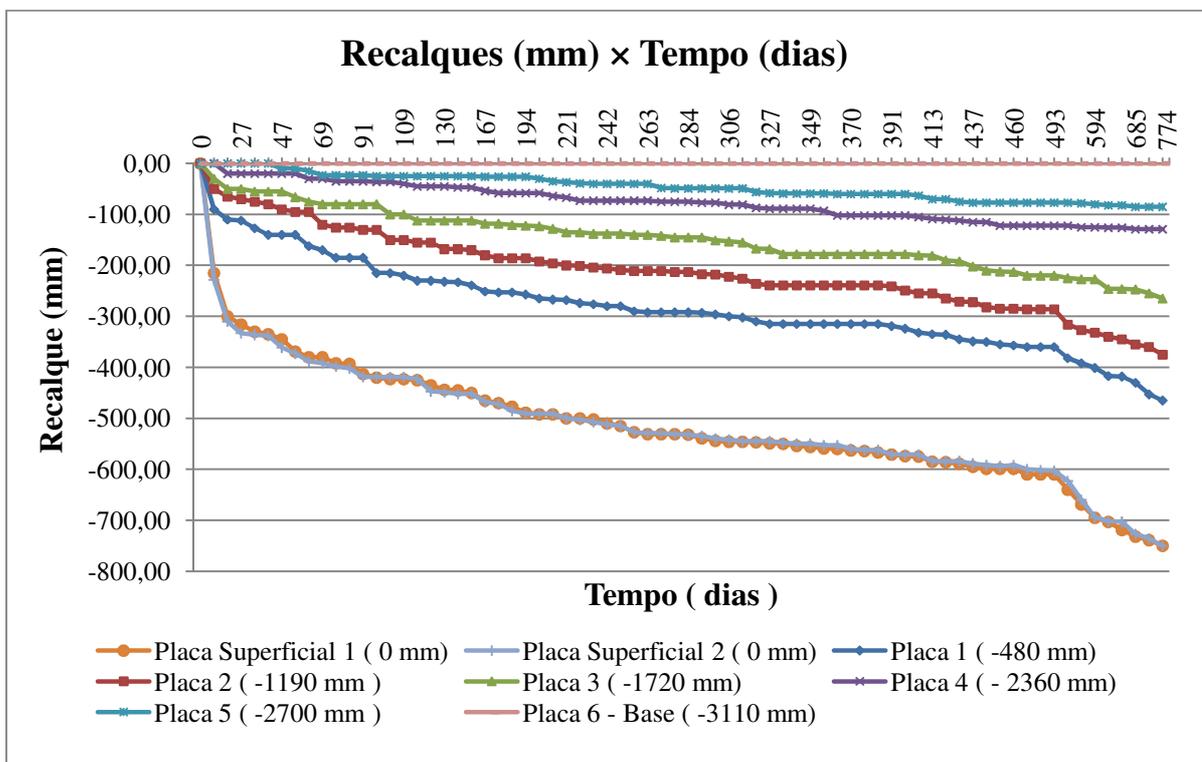
4.2 RECALQUES *IN SITU*

4.2.1 Recalque ao longo do tempo

Toda a caracterização física, além do comportamento geomecânico dos resíduos de Campina Grande/PB, foram de extrema importância para esta fase da pesquisa, onde serão

analisados a evolução dos recalques ao longo do tempo, no interior de um aterro em escala experimental, apresentada na Figura 33.

Figura 33 - Recalques dos RSU no interior da Célula Experimental.



Para a análise das deformações ocorridas, considerou-se o posicionamento inicial de seis placas em profundidade e duas placas superficiais. O posicionamento das placas Superficiais 1 e 2, localizadas entre a última camada de resíduos depositada e a camada de solo impermeabilizante de cobertura, foi determinada como posição inicial a 0 mm. Todas as placas em profundidade, nomeadas de 1 à 6, tomaram esse posicionamento como referência, estando a Placa 1 localizada inicialmente a 480 mm da referência, a Placa 2 a 1190 mm, a Placa 3 a 1720 mm, a Placa 4 a 2360 mm, a Placa 5 a 2700 mm e a Placa 6 a 3110 mm, esta última tocando a base da célula experimental.

É notável que as placas superficiais, acabam refletindo o recalque total da Célula Experimental, enquanto que as placas de 1 à 6 são capazes de identificar se a deformação é mais intensa em algum nível de profundidade dos resíduos.

No geral, a Figura 33, evidencia que o comportamento de todas as placas apresentam conformidade semelhante, ou seja, o formato da curva é praticamente o mesmo para diversas profundidades.

Conforme, os resultados já apresentados nesta pesquisa, observa-se que há um grande número de processos envolvidos nos mecanismos de recalque. A maior parcela dos recalques ao longo do tempo demonstrados na Figura 33, expressam a ocorrência simultânea de recalques primários e secundários.

É comumente aceito que o recalque de RSU ocorram por meio de processos mecânicos e biológicos (HETTIARACHCHI, 2009; DIXON & JONES, 2005). Sendo assim, nos primeiros 27 dias de monitoramento pode-se verificar recalques elevados em praticamente todas as placas, fase caracterizada pela predominância da compressibilidade, em que os recalques ocorridos no interior da célula experimental podem ter sido causados pela distorção física, flexão, esmagamento e reorientação das partículas de resíduo devido à carga aplicada e sua fluência (BAREITHER *et al.*, 2008).

Para as Placas inferiores, 4 e 5, observou-se um comportamento inicial praticamente incompressível, essa característica já era esperada por Alcantara (2007) e Catapreta (2008), os autores afirmam que as camadas mais profundas, provavelmente, recebem uma compactação mais eficiente durante o processo de enchimento, resultando em recalques discretos ou inexistentes inicialmente.

Durante esta fase de recalques intensos, fica difícil a identificação do momento exato em que as deformações dos resíduos assumem as características biológicas, em consequência da biodegradação anaeróbica de matéria orgânica. Elagroudy (2013) afirma que a indução da perda de massa sólida, provavelmente convertida em biogás, sólidos dissolvidos e suspensão do lixiviado pode ocorrer desde o início da disposição dos resíduos, reduzindo gradativamente sua massa ao longo do tempo.

Na fase final de monitoramento verificou-se, através da Placas superficiais, um recalque total de aproximadamente 770 mm, deformação rápida levando em consideração o pouco tempo de monitoramento (dois anos).

Em profundidade, observou-se que nas camadas onde estão localizadas as Placas 1, 2 e 3 as deformações foram intensas e contínuas ao longo do tempo, esta condição era esperada, pois segundo Melo (2003) em camadas superiores o peso da própria massa de resíduos associada à decomposição microbiana dos resíduos resulta em maiores recalques.

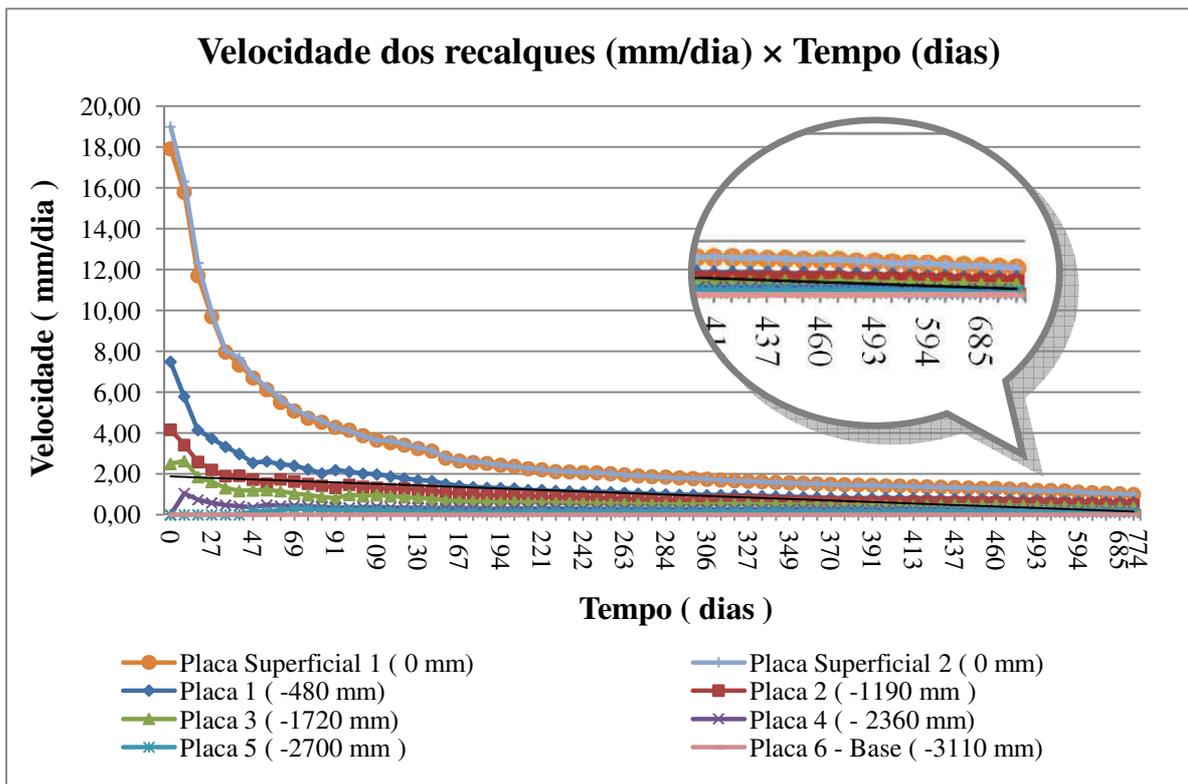
Nas Placas 4 e 5, a partir do 413^o ouve uma tendência para estabilização, onde as deformações passam a ser mínimas. Sabe-se que os recalques diminuem com o aumento da profundidade, porém esta tendência de estabilização também pode ser explicada pelo posicionamento das placas, que após recalques sucessivos, na fase final de monitoramento

encontravam-se abaixo do orifício inferior de coleta de resíduos, e portanto, passaram a não sofrer influência das deformações mecânicas devido as retiradas mensais de amostra (Aproximadamente 1,5 kg de resíduos por nível) para análises laboratoriais.

4.2.2 Velocidade dos recalques

As maiores taxas de recalques acontecem nos primeiros meses de disposição dos resíduos e as maiores velocidades de recalques também ocorrem nestes dias (MELO, 2011). Avaliar o quanto a taxa de recalques decresce com o tempo, pode ser melhor entendido a partir da Figura 34.

Figura 34 - Velocidades dos recalques ao longo do tempo.



Verificou-se no gráfico da Figura 337 que a velocidade chegou próxima dos 19 mm/dia, para os primeiros estágios de observação nas Placas Superficiais 1 e 2, porém para camadas mais profundas as deformações verticais não obedeceram a mesma velocidade, sendo de aproximadamente 7,5 mm/dia para a Placa 1, de 4 mm/dia para a Placa 2, de quase 3 mm/dia para a Placa 3, em torno de 1,5 mm/dia para a Placa 4 e com velocidade próximas de 0 mm/dia na Placa 5, essa realidade alterou-se com o tempo, exceto para a Placa 6 que

manteve-se imóvel, sobre a camada de base da Célula Experimental, durante todo o período de monitoramento.

Batista *et al.* (2013) também encontraram valores semelhantes, onde a velocidade por placa foi de até 10 vezes maior em algumas placas nos primeiros trinta dias se comparado com os demais dias em que foram monitoradas as deformações verticais. Com o passar dos dias, a velocidade diminuem, pois as intensidades dos recalques também diminuem.

Sabe-se que os dados resultantes do monitoramento geralmente apresentam velocidades médias iniciais muito elevadas e vão diminuindo com o tempo, inicialmente, de forma muito rápida e depois, mais lenta, até se manterem uniformes (COMPARIN, 2011).

Após aproximadamente 200 dias observou-se que essas taxas elevadas de velocidade foram reduzindo e apresentando uma constância para todas as placas, onde a partir do 130º dia todas as placas em profundidade já apresentavam velocidades inferiores a 2 mm/dia, essa mesma característica só foi observada nas Placas superficiais depois do 306º dia.

Conforme detalhe da Figura 34, na fase final de monitoramento observa-se a uniformidade nas velocidades, onde para as placas em profundidade as velocidade aproximam-se cada vez mais de 0 mm/dia, enquanto que as placas superficiais ainda deformam-se a velocidades em torno de 1 mm/dia.

4.2.1 Deformação específica em função do tempo

No que se refere à deformação específica pode-se observar, através da Figura 35, que os recalques ocorridos corroboram com a literatura, onde estimativas de recalques totais de aterros sanitários variam de 25 a 50 % (Wall & Zeiss, 1995; Edgers *et al.*, 1992).

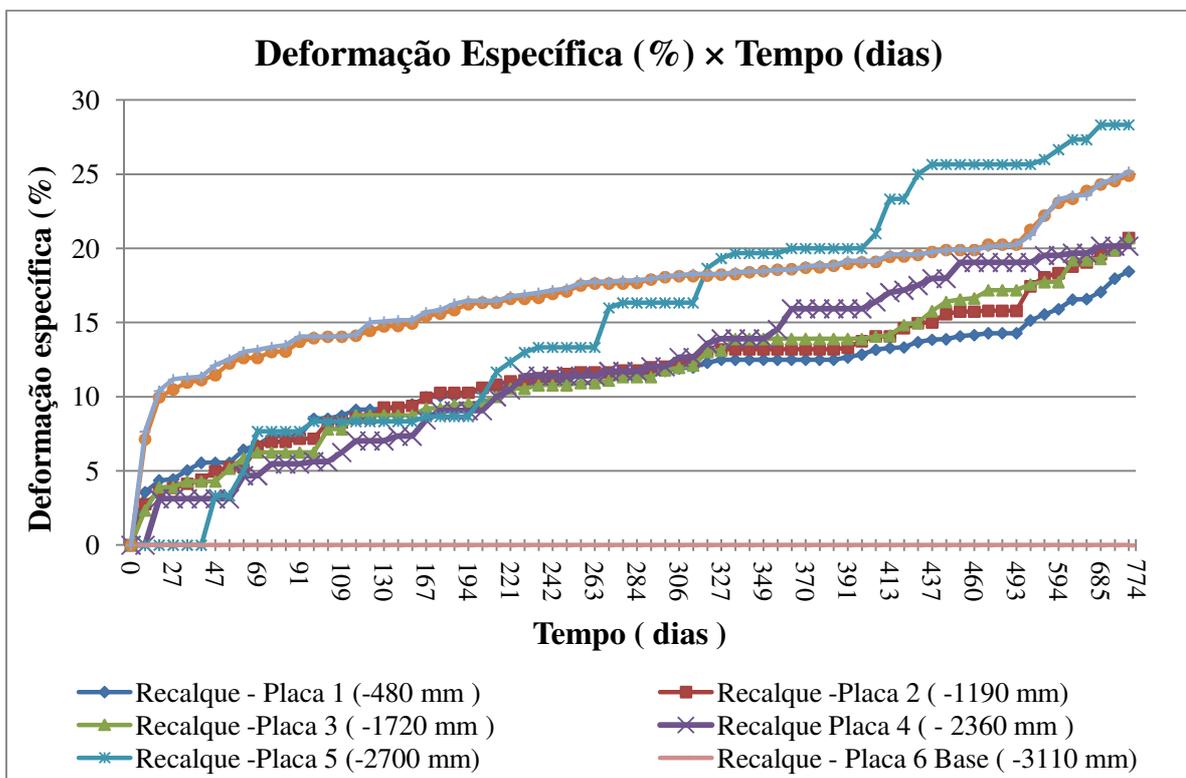
Verificou-se que a deformação total, representada pelos recalques ocorridos nas placas superficiais, alcançaram após 774 dias (pouco mais de 2 anos) de monitoramento o valor de 25%, esta porcentagem indica que a Célula Experimental, já deformou praticamente 1/4 da sua altura inicial. Para alguns autores como, Van Maeerten *et al.* (1995), Coumoulos e Koryalos (1997) e Abreu (2000) esta deformação já demonstra uma tendência para alcance da fase final de sua vida útil, porém a célula de experimental ainda apresenta recalques expressivos em suas placas superiores, indicando que ainda há muita atividade sendo realizada tanto na parcela mecânica, quanto na biológica dos recalques.

Os resíduos estudados levaram em torno de 30 dias para deformar 10% de sua altura inicial, depois passaram aproximadamente 460 dias pra deformar mais 10%, e nos últimos

380 dias de monitoramento deformou-se apenas 5%, confirmando a tendência de redução dos recalques ao longo do tempo previstos pela literatura técnica (BOSCOV, 2008; MELO, 2003).

Características de deformação específica, semelhantes as apresentadas na Figura 35, também foram encontradas por Batista (2012), onde para o mesmo período de monitoramento, seus estudos apresentaram uma deformação da ordem de 33%, considerando que as dimensões da célula experimental de aterro estudado pelo autor, era um pouco menor do que as apresentadas nesta pesquisa, sugere-se que as deformações dos recalques ocorram mais rapidamente em escalas menores, principalmente se comparadas a aterros em escala real.

Figura 35 - Deformação específica da massa de resíduos em função do tempo.



Quanto aos recalque em profundidade, destaca-se a deformação da Placa 5, que apesar de nos primeiros 40 dias não ter apresentado nenhuma deformação, a partir de 200 dias de monitoramento passou a deforma-se mais do que as demais placas em profundidade, e após aproximadamente 300 dias de monitoramento, essas deformações também superam os recalques registrado pelas placas superficiais, atingindo em sua fase final uma deformação específica de 28%.

A configuração da curva de deformação desta placa (Placa 5), demonstrou que a camada em que ela se apoia passou, durante o tempo de monitoramento, por períodos alternados de recalques zero, onde não há deformação, e de recalques bruscos. Esta característica é comum em algumas camadas do aterro, que resistem bem aos vazios gerados pela degradação da matéria orgânica por um certo período de tempo (resultando em recalque zero), até que em um determinado momento a estrutura da camada desestabiliza-se, não suportando os carregamentos impostos, o que resulta em verdadeiros colapsos na deformação (recalques bruscos), deformação semelhante também foi encontrada nos estudos de recalque apresentados por Melo (2003).

Segundo Schuler (2010) o comportamento distinto das deformações e dos recalques em aterro conduz a uma consolidação mais rápida, e reduz a porosidade na parte inferior do aterro, o que pode causar um fluxo preferencial do lixiviado. Isso explica porque neste nível de profundidade os recalques são mais lentos e os teores de umidade tão elevados.

Nas placas em profundidade 1, 2 3 e 4 a deformação foi de 20% de sua altura inicial, essa característica indica que, nas camadas em que elas estão localizadas ainda há muita matéria orgânica para ser degradada. Sendo assim, recalques sucessivos ainda vão ocorrer, antes da Célula em estudo atingir sua capacidade total de deformação.

4.3 AJUSTES DOS DADOS AOS MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES

Para análise estatística do comportamento dos dados de recalques obtidos experimentalmente foram testados quatro modelos de previsão consagrados na literatura, um modelo convencional baseado em expressões semelhantes às da teoria de adensamento de solos, um modelo de regressão com função logarítmica, um modelo de regressão com função hiperbólica e por fim um modelo baseado na biodegradação.

4.3.1 Testes para o modelo de Sowers (1973)

O modelo de Sowers leva em consideração o recalque primário para prever os recalques ao longo do tempo. Sendo assim, apesar de autores como Wall e Zeiss (1995) e Melo (2003) afirmarem que os recalques primários e secundários ocorrerem simultaneamente, foi preciso adotar de acordo com os dados experimentais coletados, que até 12 dias de

monitoramento houve a predominância dos recalques devido ao carregamento, portanto, utilizou-se para os testes a altura inicial dos recalques secundários encontrada pelo primeiro dado de recalque registrado experimentalmente ($H_0= 282$ cm; $t_1=12$ dias).

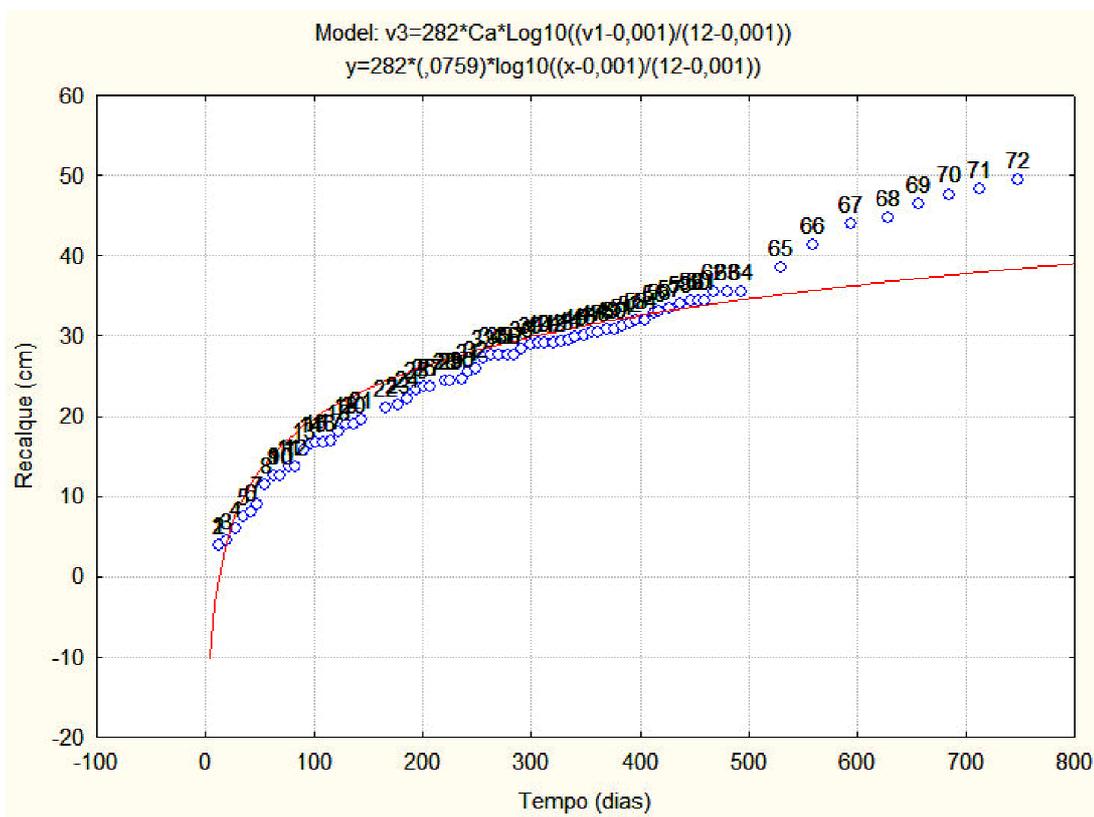
A partir desses dados, pode-se através do *software* STATISTICA® com uso dos métodos iterativos de Gauss-Newton, estimar os parâmetros do modelo (Tabela 5) e verificar como os dados se ajustaram a curva teórica (Figura 36).

Tabela 5 - Parâmetros obtidos no ajuste dos dados ao modelo de Sowers (1973).

Variável Dependente	Variável Independente	Constante Estimada	r	R ²	p-value	Nível de Significância
S(t) (Recalque Secundário)	t (tempo)	Ca = 0,0759	0,9422	0,8878	0,00	5%

Após o ajuste, encontrou-se para o resíduo de Campina Grande um Coeficiente de Compressibilidade igual a 0,0759, com o *p-valor* próximo a zero, confirmando-se que a constante estimada explica bem o modelo.

Figura 36 - Curva de ajuste gerada para o teste do modelo de Sowers (1973).



O gráfico da Figura 36 apresenta a disposição dos dados observados e da curva teórica gerada pelo modelo (curva em vermelho), onde a correlação encontrada no ajuste foi de 0,94, relação considerada excelente entre os dados observados e os dados esperados, que resultou em um coeficiente de determinação (R^2) de 0,8878, ou seja, o modelo de Sowers conseguiu explicar 88,87% dos dados experimentais, para 95% de confiança.

Verificou-se que os recalques dos resíduos da Célula Experimental aproximaram-se bastante dos previstos por Sowers (1973) até o 500° dia de monitoramento, após esse período os recalques teóricos aumentaram discretamente, enquanto que os dados *in situ* continuaram apresentando recalques bem mais significativos. Essa diferença pode ser explicada pelo fato do modelo testado ter bases sólidas na geotecnia clássica, considerando o comportamento mecânico e não a biodegradação para prevê as deformações verticais. De acordo com a composição gravimétrica desses resíduos, há no interior da Célula de aterro experimental muito material possível de ser degradado (46,9% de orgânicos entre outros), o que exige um tempo maior para estabilização do que o previsto pelo modelo.

Esses resultados indicam que, utilizando um $C_a = 0,0759$, é possível aplicar o modelo de Sowers para elaborar um projeto de aterro em escala real, prevendo o recalque no tempo para as condições dos resíduos de Campina Grande/PB.

4.3.2 Testes para o modelo de Yen e Scalon (1975)

Yen & Scalon (1975) possibilitam, através de um modelo empírico simples, a previsão da velocidade dos recalques em função do tempo, o problema desse estudo é a necessidade de se obter os valores de suas constantes empíricas (m e n) para ajustar ao modelo.

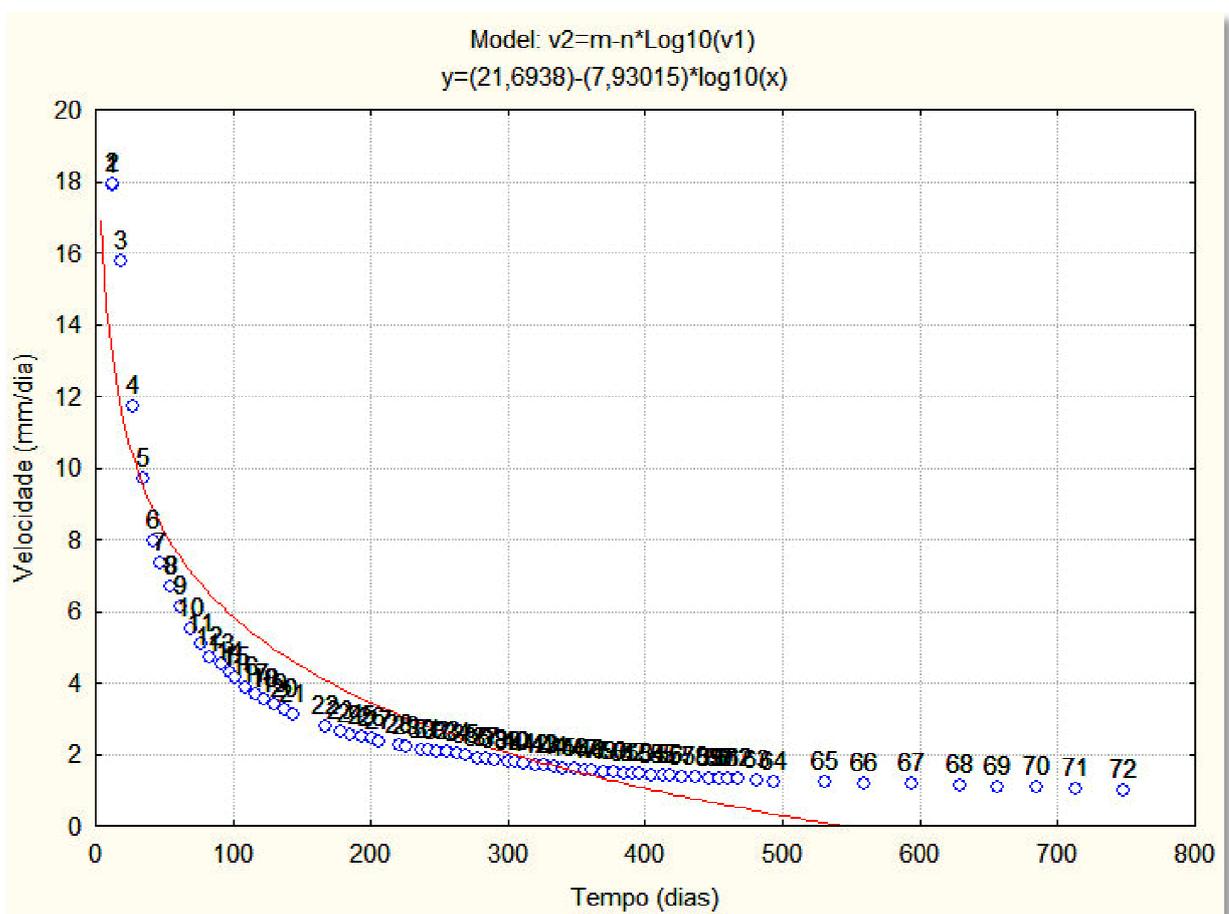
A partir dos dados de velocidade dos recalques obtidos com monitoramento da Célula Experimental contendo os RSU de Campina Grande/PB, pode-se testar interativamente o modelo de Yen & Scalon obtendo os parâmetros apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetro obtidos no ajuste dos dados ao modelo de Yen & Scalon (1975).

Variável Dependente	Variável Independente	Constante Estimada	r	R^2	p-value	Nível de Significância
v(t) (velocidade)	t (tempo)	m= 21,69 n= 7,93	0,9196	0,8457	0,00 0,00	5%

A regressão gerada para este modelo apresentou um ajuste tão bom quanto o encontrado pelo modelo de Sowers (1973), onde as constantes empíricas estimadas $m=21,69$ e $n=7,93$ explicaram bem o decréscimo da velocidade com o logaritmo do tempo. Foram encontrados p-valores iguais a zero para um nível de significância de 5%, e uma correlação entre as variáveis resposta de aproximadamente 0,92, esses parâmetros demonstraram que o modelo de Yen & Scalon teve um ajuste excelente para os dados de Campina Grande, realidade também observada na Figura 37.

Figura 37 - Curva de ajuste gerada para o teste do modelo de Yen & Scalon (1975).



O R^2 encontrado foi de 84,57%, isso significa dizer que apenas 15,43% da variabilidade da velocidade dos recalques não podem ser descrito ou explicado pela variabilidade do modelo.

Essa situação é bem representada pela Figura 37, onde observa-se como as curvas teórica e experimental quase se sobrepõem. Nos primeiros 50 dias os recalques foram um pouco mais rápidos do que o esperado, porém do 50º dia ao 350º dia, a velocidade dos

recalques foi levemente inferior ao previsto pelo modelo. Após esse período, os dados experimentais decresceram até apresentar uma certa constância em suas velocidades, aproximando-se de zero.

A partir de 550 dias as interações ao modelo teórico proposto por Yen & Scalon (1975), já previa o final da vida útil do aterro estudado, porém experimentalmente os recalques não cessaram, continuaram evoluindo a uma taxa praticamente constante, em torno de 1,5 mm/dia. Essa discrepância entre a curva estimada pelo modelo e os dados observados, pode ser entendida a partir dos apontamentos de Catapreta (2008), que afirma que o modelo de Yen & Scalon (1975) não responde tão bem, após longos períodos de monitoramento.

Para prevê as velocidades em aterro experimental, o ajuste do modelo gerado é excelente, mas sempre que as escalas do dimensionamento de um aterro forem elevadas, é preciso estimar novos valores para as constantes empíricas m e n .

4.3.3 Teste para o modelo de Ling et al. (1998)

Ling *et al.* (1998), analisando as possíveis limitações de um modelo logarítmico, lançou uma função hiperbólica para prever os recalque secundários, considerando o último recalque registrado e a taxa de velocidade dos recalques ao longo do tempo.

Para o teste desse modelo utilizou-se o recalque final igual a $S_{ult}=77$ cm, e considerou-se a taxa de velocidade p_0 como coeficiente a ser estimado pelo modelo, a regressão resultante dos processos iterativos de Gauss-Newton para funções não lineares alcançaram os parâmetros expostos na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetro obtidos no ajuste dos dados ao modelo de Ling *et al.* (1998).

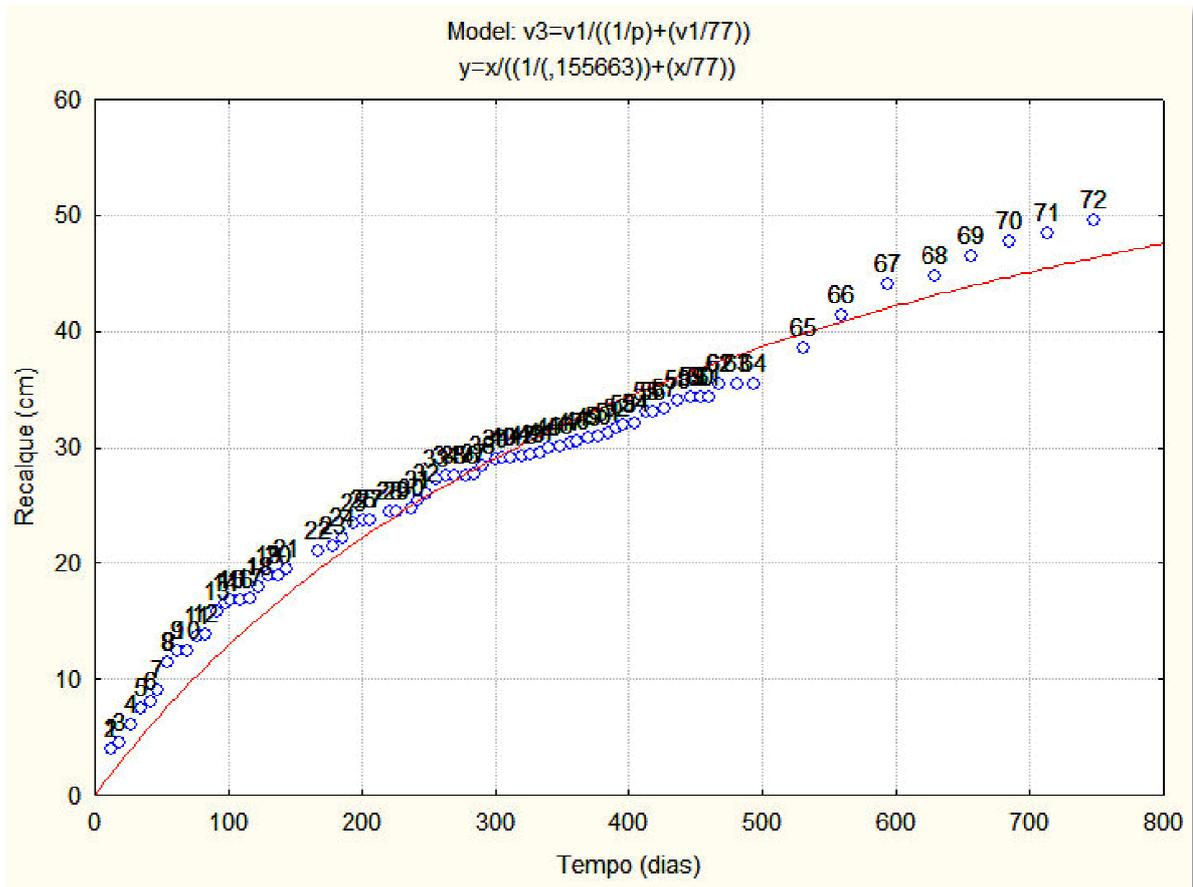
Variável Dependente	Variável Independente	Constante Estimada	r	R ²	p-value	Nível de Significância
S(t) (Recalque Secundário)	t (tempo)	$p_0= 0,1557$	0,9799	0,9603	0,00	5%

Segundo o modelo hiperbólico, a taxa de velocidade encontrada para os recalques secundários dos RSU de Campina Grande foi de $p_0= 0,1557$ cm/dia, valor que auxiliou com um nível de 5% de significância a otimização do ajuste dos dados ao modelo.

O grau de associação entre as variáveis observadas e previstas apresentaram a melhor correlação entre todos os modelos testados, foi de aproximadamente 0,98 a intensidade da

relação entre os recalques *in situ* e o comportamento dos recalques esperado por Ling *et al.* (1998). Este excelente ajuste é apresentado na Figura 38.

Figura 38 - Curva de ajuste gerada para o teste do modelo de Ling *et al.* (1998).



Sabendo que o coeficiente de determinação do ajuste foi de 96,03%, observa-se a partir do gráfico, que os 4% da variabilidade não explicada pelo modelo, certamente foi estabelecida nos primeiros e nos últimos 200 dias de monitoramento, onde os recalques observados foram discretamente mais elevados do que o previsto, provavelmente devido a taxa de degradação dos resíduos sólidos.

O modelo gerado estima bem a previsão dos recalques ao longo do tempo para aterros em qualquer escala utilizado-se uma taxa de velocidade de 0,15 cm/dia, porém a sua utilização não é recomendada para as fases iniciais de projeto e dimensionamento de aterros, onde não há o conhecimento de nenhum dado de recalque.

4.3.4 Teste para o modelo de Simões (2000)

O modelo biológico de Simões (2000) considera que o recalque total de um aterro é resultante das deformações sofridas pelo carregamento imposto, somado ao comportamento viscoso em função do tempo e as reduções devido a biodegradação. Sendo assim, para ajustar os dados experimentais ao modelo, foi preciso analisar cada parcela.

Na parcela do carregamento, foi considerado o recalque registrado nos primeiros 12 dias de monitoramento e o peso da camada de cobertura para encontrar o Coeficiente de compressibilidade $C_c = 0,0211$, tomando-se a altura inicial $H_0=311$ cm, estimou-se a tensão P a partir dos processos iterativos.

Para a deformação da parcela do comportamento viscoso, que é a característica apresentada pelos RSU ao longo do tempo, considerou-se apenas o recalque secundário adotando-se $H_1 = 282$ cm para $t_0=12$ dias, deixando o coeficiente de Compressibilidade Ca' para ser estimado pelo modelo.

Já para a parcela biológica, foi preciso considerar a massa biodegradável, ou seja, o peso da matéria orgânica presente na Célula Experimental, e a sua taxa de biodegradação. Esta última foi obtida pela média das taxas encontradas por Melo (2011) para os resíduos de Campina Grande, onde o k utilizado foi igual a $5,33 \times 10^{-3}$.

O regressão estatística por meio de métodos iterativos resultou nos parâmetros apresentados na Tabela 8.

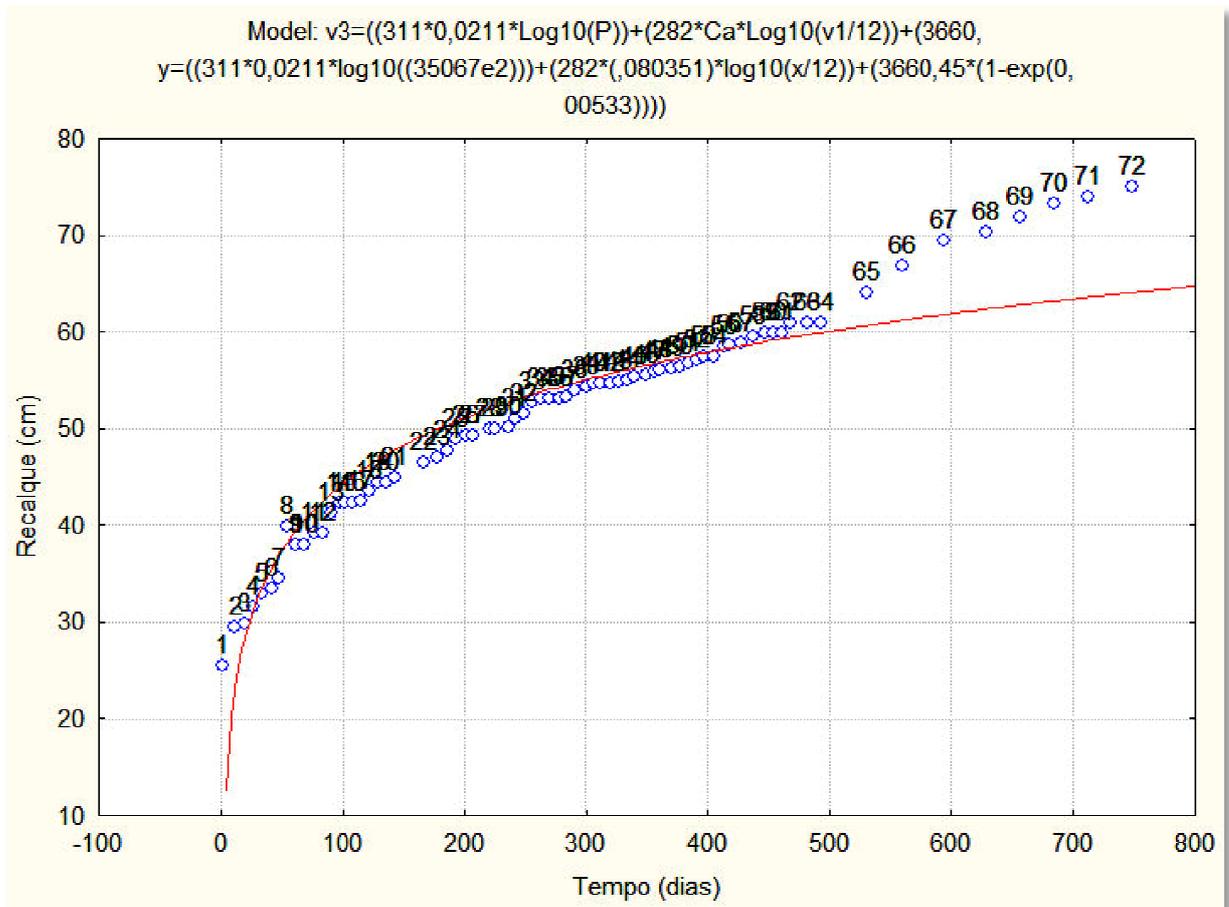
Tabela 8 - Parâmetro obtidos no ajuste dos dados ao modelo de Simões (2000).

Variável Dependente	Variável Independente	Constante Estimada	r	R ²	p-value	Nível de Significância
$\Delta H(t)$ (Recalque Total)	t (tempo)	P= 3506700 Ca' = 0,080	0,9078	0,8241	0,02 0,00	5%

O ajuste do modelo de Simões representou forte correlação entre os dados, para 95% de confiança. Porém, mesmo com um $r = 0,91$, foi dentre os modelos testados, o que apresentou menor associação entre os recalques observados e os recalques previstos.

Conforme comportamento da curva de ajuste, exposta na Figura 39, os resíduos gerados neste teste resultou em um coeficiente de determinação $R^2= 82,41\%$.

Figura 39 - Curva de ajuste gerada para o teste do modelo de Simões (1973).



Os dados ajustam-se adequadamente ao modelo até 500 dias de monitoramento, a partir desse período observou-se, possivelmente, a parcela de 17,6% das variáveis que não são explicadas pelo modelo, onde os recalques no interior da Célula Experimental foram visivelmente superiores ao esperado.

Essa diferença característica também foi encontrada no ajuste ao modelo de Sowers (1973), e de forma mais discreta nos testes para Yen & Scalon (1975) e Ling *et al.* (1998), portanto, se essa alteração não pode ser explicada pelo fator biológico intrínseco ao modelo de Simões (2000), é porque há atividades que influenciam de maneira inesperada os recalques dos resíduos na fase final de monitoramento de células experimentais.

Diante desta prerrogativa, analisa-se que as retiradas mensais de aproximadamente 1,5 Kg de resíduos para análises laboratoriais, têm elevado significativamente os recalques em sua fase final de monitoramento. Embora, nos primeiros dias essa atividade não exerça grande influência no comportamento interno da célula, após 500 dias de acondicionamento espera-se

uma redução e estabilização das deformações, o que não ocorrerá se continuar havendo coletas sucessivas de resíduos.

Em aterros de escala real, essas retiradas de amostras também acontecem periodicamente, porém para Células de resíduos com dimensões reduzidas, tais remoções podem alterar em significativas proporções o comportamento do sistema.

4.3.5 Análises de R², SQR e AIC

Os testes realizados para os modelos de recalque teóricos demonstraram que o dados em estudo ajustaram-se muito bem para um nível de 5% de significância, ou seja para 95% de confiança ou certeza de que o comportamento dos resíduos estudados apresentam semelhança aceitável com os modelos teóricos testados.

Considerando essa forte correlação dos dados para todos os modelos, fez-se necessário testar, quanto ao coeficiente de determinação, soma dos quadrados dos resíduos e critério de Akaike, qual modelo melhor se adéqua aos RSU de Campina Grande, os resultados podem ser observados através da Tabela 9.

Tabela 9 - Resultado dos testes realizados para quatro modelos de previsão dos recalques.

Modelos	R²	SQR	AIC
Sowers (1973)	88,78%	946,15	187,45
Yen & Scalon (1975)	84,57%	140,57	52,17
Ling <i>et al.</i> (1998)	96,03%	334,62	112,62
Simões (2000)	82,41%	1503,21	224,79

De acordo com a análise dos resíduos estatísticos, ou erros, gerados pelo ajuste das curvas, o modelo biodegradativo de Simões (2000) foi, dentre os modelos testados, o que menos se adequou aos dados experimentais, para todos os critérios observados (R², SQR e AIC), isso não significa que este modelo é menos adequado para prevê os recalques, indica apenas que os demais modelos respondem melhor para condições experimentais.

Segundo a análise do coeficiente de determinação o modelo de Ling *et al.* (1998) foi o mais adequado aos dados observados, com um R² de 96,03%, apresentou uma excelente curva de ajuste, seguido pelos modelos de Sowers (1973) e Yen & Scalon (1975).

Porém, quanto a análise dos resíduos a partir dos critérios de Akaike e da soma dos quadrados dos resíduos, o modelo de previsão dos recalques que apresentou os menores índices de AIC e SQR foi exatamente o que melhor se adequou aos dados observados. De acordo com a Tabela 10, o ajuste que melhor atendeu a esses dois critérios foi o apresentado por Yen & Scalon (1975), seguido por Ling *et al.* (1998) e Sowers (1973).

Verificou-se que os modelos Hiperbólico de Ling *et al.* (1998) e Logarítmico de Yen & Scalon (1975) apresentaram as melhores respostas diante das regressões realizadas, um para os recalques ao longo do tempo e o outro para a velocidade com que esses recalques ocorrem.

Portanto, para determinação do modelo mais adequado estatisticamente aos dados experimentais de recalque em Campina Grande/PB, escolheu-se aquele que atendeu bem a dois dos três testes realizados, que foi o modelo de Yen & Scalon (1975). Essa escolha também foi baseada na hierarquia de relevância dos testes ($AIC > SQR > R^2$), onde a literatura afirma que o coeficiente de determinação pode apresentar falhas a partir da interação de um grande número de dados, sendo mais significativo e seguro a escolha do modelo segundo os critérios de Akaike e Soma dos Quadrados dos Resíduos.

É importante enfatizar, que o modelo gerado a partir do ajuste ao modelo de Yen & Scalon (1975) foi escolhido o melhor para prever as velocidade dos recalques levando em consideração aterros em escalas experimentais com pouco tempo de monitoramento, para previsões futuras de aterros em escala real é possível que os demais modelos gerados apresentem melhores respostas, pois o modelo ajustado é limitado pelo fator tempo.

5. CONCLUSÕES

- O RSU de Campina Grande/PB é, em sua maioria, composto por materiais putrescíveis, foi encontrado 46,9% de matéria orgânica favorável a ser decomposta ao longo do tempo, a transformação de toda essa massa biodegradável em líquidos e gases resultou em recalques significativos durante o período de monitoramento.
- A gravimetria de materiais potencialmente recicláveis, como plásticos, papéis, papelão e compósitos, não foi tão expressiva quanto a quantidade de orgânicos. Mas, em termos de volume, ocuparam em torno de 80% da Célula de resíduos estudada, cuja capacidade de deformação exerceu maior influência durante o período de recalque imediato.
- O perfil granulométrico dos resíduos de Campina Grande-PB foi caracterizado por uma curva bem graduada com forte presença de finos, que favoreceu boas condições de compactação, degradabilidade e compressibilidade dos resíduos.
- O teor da fração grossa, foi composta principalmente por materiais recicláveis, com pouco peso e volumes elevados, cujos vazios formados ajudaram a prologar o tempo de recalque e a biodegradação dos resíduos.
- O grau de compactação alcançado para os resíduos no interior da célula experimental foi de 55,16%, o teor de vazios gerado sob essas condições foi favorável para que a acomodação das partículas acontecesse lentamente, ao longo do tempo de monitoramento, resultando no aumento dos recalques devido a fatores mecânicos.
- A evolução da umidade dos resíduos depositados na célula experimental tanto em profundidade como no tempo, principalmente para as camadas intermediária e inferior, propiciaram boas condições ao desenvolvimento de microrganismos degradadores da matéria orgânica, proporcionando recalques expressivos em camadas com elevada umidade.

- O comportamento dos recalques no tempo, foi influenciado positivamente pelas características físicas, geomecânicas e biológicas dos resíduos de Campina Grande, onde os resultados sugerem que na célula experimental de aterro a degradação dos resíduos acontece mais rapidamente se comparado a aterros em escala real.
- A velocidade dos recalques mostrou-se mais acentuada nos primeiros trinta dias de acondicionamento dos resíduos devido, principalmente, a aspectos mecânicos, com o passar dos dias os recalques superficiais e em profundidades apresentaram uma relação direta entre aspectos mecânicos e biodegradativos.
- O recalque total foi de aproximadamente 770 mm, o que significa que os resíduos já deformaram 25% de sua altura inicial, e apesar da literatura prevê uma tendência para atingir a capacidade de deformação total, no interior da célula experimental, ainda há muita atividade sendo realizada tanto na parcela mecânica, quanto na biológica, resultando em recalques significativos.
- Os maiores recalques foram registrados nas placas mais profundas, onde a última camada sofreu períodos alternados de recalques zero e recalques bruscos, devido a instabilidade gerada pelos vazios resultantes da degradação.
- Estatisticamente, verificou-se que os recalque dos resíduos de Campina Grande ajustaram-se muito bem a modelos de previsão consagrados na literatura, considerando um nível de 5% de significância, ou seja, 95% de certeza que os modelos explicaram bem os dados observados.
- O ajuste das curvas demonstrou que os recalques observados responderam bem, conforme o esperado pela literatura, até 500 dias de monitoramento, após esse período os recalques são influenciados por fatores operacionais da célula experimental.
- Para pouco tempo de monitoramento, o modelo de Yen & Scalon (1975) foi o que melhor se adequou ao comportamento dos resíduos da cidade, de acordo com os critérios de Akaike e Soma dos Quadrados dos Resíduos para 95% de

confiança, podendo ser facilmente utilizados para prever a velocidade dos recalque e a vida útil de um aterro com características semelhantes.

- A realização desta pesquisa foi especialmente importante, pois além do estudo da evolução dos recalque contribuir para o entendimento do comportamento dos resíduos, o ajuste dos dados observados geraram modelos de previsão de recalques capazes de dimensionar e/ou projetar aterros em diversas escalas, tanto para a cidade de Campina Grande/PB como para aterros de qualquer outra localidade com características semelhantes. A utilização desses modelos também pode determinar a capacidade volumétrica do aterro, o seu tempo de vida útil, a previsão da velocidade de seus recalques, e ainda estimar em quanto tempo os recalques cessarão.

6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Realizar ensaios analisando a resistência dos resíduos, para encontrar parâmetros como coeficiente de compressibilidade, coesão, ângulo de atrito e outros, em condições ideais que possibilitem o entendimento das deformações ocorridas em um aterro de RSU.
- Aprimorar o estudo em Células Experimentais, desenvolvendo técnicas que favoreçam a obtenção do comportamento dos recalque devido a biodegradação ao longo do tempo, minimizando a influência que o monitoramento dos demais parâmetros dos resíduos exercem sobre a deformação mecânica da estrutura, através da retirada de amostras.
- Aproveitar os dados experimentais coletados, para ampliar as análises estatísticas e através de planejamento fatorial e análise multivariada dos dados, elaborar um novo modelo de previsão de recalque que considere as características dos resíduos de Campina Grande.
- Desenvolver pesquisas em aterros de escala real e experimental, que validem os resultados apresentados neste trabalho, verificando se os dados de aterros comprovam a eficiência dos modelos de recalques para estimativas do tempo de vida útil e taxas de velocidade das deformações.
- Ampliar os estudos testando outros modelos de previsão que considerem tempos futuros, ou seja, períodos de recalques com tempo mais prolongados, da ordem de 10 a 20 anos, para avaliar como seria o comportamento das deformações em aterros de escala real.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas): **NBR 10007**: Resíduos Sólidos – amostragem de Resíduos. Rio de Janeiro, 2004. 21p.

_____ **NBR 13292**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

_____ **NBR 14545**: Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000. 12p.

_____ **NBR 6457**: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986a. 9p.

_____ **NBR 6459**: Solo - determinação do limite de liquidez – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984a. 6p.

_____ **NBR 6508**: Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm - determinação da massa específica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984b. 8p.

_____ **NBR 7180**: Solo - determinação do limite de plasticidade – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984c. 3p.

_____ **NBR 7181**: Solo - análise granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

_____ **NBR 7182**: Solo - ensaio de compactação – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986.

_____ **NBR 7185** - Solo - Determinação Da Massa Específica Aparente Do Solo “In Situ” Com Emprego Do Frasco De Areia. Rio de Janeiro – RJ, Ago 1986.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos No Brasil**. Grappa Editora e Comunicação. São Paulo - SP, 2012.

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

AIRES, K. O. **Monitoramento das concentrações de gases em uma célula experimental de Resíduos Sólidos Urbanos na cidade de Campina Grande/PB**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande – PB. 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.

ALCÂNTARA, P.B., Monteiro, V.E. D, Palha, M.L.A. P, Araújo, J.M., Jucá, J.F.T., **“Construção e Monitoramento de uma Célula Experimental de RSU em Escala Reduzida”**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande-MS, 2005.

ALVES, F. S. **Influência das condições meteorológicas na biodegradação dos Resíduos Sólidos Urbanos em Campina Grande-pb**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande – PB. 2012.

ANDRADE, S.M.A., **Caracterização físico-química e tratabilidade por coagulação-fluculação dos líquidos percolados gerados no aterro sanitário de Uberlândia – MG**. Dissertação M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2002.

ARAÚJO, E. P. **Estudo do Comportamento de Bactérias Aeróbias e Anaeróbias Totais na Biodegradabilidade de Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina Grande-PB**. 116p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

BAREITHER, C. A.; BREITMEYER, R. J.; ERSES A. S.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B.; BARLAZ, M. A. **Relative contributions of moisture and biological activity on**

compression of municipal solid waste in bioreactor landfills. Proceedings of the Global Waste Symposium. Copper Mountain, Colorado, USA, 2008.

BATISTA, L. S.; MELO, M. C.; SOUZA, F. Q. e MONTEIRO, V. E. D. **Estudo de recalques e suas interações em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos.** Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade. Editora Intersaberes | vol.3 n.2 | jan/jun 2013.

BATISTA, L. S. **Estudo de parâmetros geotécnicos e suas interações em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande – PB. 2012.

BIDONE, F.R.A., POVINELLI, J. **Conceitos Básicos de Resíduos sólidos**, 1ª ed, v.1, São Carlos, EESC-USP, 1999.

BJARNGARD, A. B.; EDGERS, L. **Settlements of municipal solid waste landfills.** Proc. 13th Annual Madison Waste Conference, Madison, Wisconsin, v.1, p. 195-205,1990.

BORBA, S. M. P. **Análise de Modelo de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ, 2006

BORGATTO, A. V. A. **Estudo das Propriedades Geomecânicas de Resíduos Sólidos Urbanos Pré-Tratados**, Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro/RJ, 2010.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental.** ISBN 978-85-86238-73-4. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

BUSSAB, W. O. ; MORETTIN, P.A. **Estatística Básica.** 5ª edição. Editora Saraiva. São Paulo-SP, 2006.

CARIBÉ, R. M.; ALMEIDA, M. V. A; ARAÚJO, E. P.; MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D.; PAIVA, W. **Influência das concentrações de matéria orgânica no comportamento dos recalques em células experimentais de resíduos sólidos urbanos.** GRAL 2013 - III Conferência Internacional de Gestão de Resíduos na América Latina. São Paulo, 2013.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação.** Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte - MG, 2008.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F.; BATISTA, H. P.; MARTINS, H. L. **Avaliação da Compactação dos Resíduos Sólidos Urbanos Dispostos no Aterro Sanitário da BR-040 em Belo Horizonte – MG.** [CD ROM]. In: 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental - REGEO'2003. Porto Alegre/RS: ABMS, 2003.

CATAPRETA, C. A. A. ; SIMÕES, G. F. . **Caracterização Volumétrica de Resíduos Sólidos Urbanos Dispostos em um Aterro Sanitário Experimental.** In: XXXI Congresso Interamericano de Engenharia Sanitaria y Ambiental, Santiago / Chile, 2008.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Resíduos sólidos urbanos e limpeza pública.** 1990. São Paulo – SP.

CHEN Y.M., ZHAN L.T., XU X.B., LIU H.L. **Geo-environmental problems in landfills of MSW with high organic content.** Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013.

CODUTO, D. P.; HUITRIC, R. **Monitoring landfill movements using precise instruments.** Geotechnics of waste fills-theory and practice, STP 1070, Landva and Knowles (eds), ASTM, West Conshocken, Pa., 1990, pp. 358-369.

COMPARIN, I. **Estudo do Comportamento de Resíduos Sólidos Urbanos em Lisímetro de Caráter Experimental.** Trabalho de Conclusão de Curso para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental. Universidade De Passo Fundo - UPF, Passo Fundo/RS, 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.

COUMOULOS, D. G. *et al.* **The Main Landfill of Athens - Geotechnical Investigation.** In: SARDINIA'95- Internacional Landfill Symposium, 5., 1995, Cagliari, Italy. Proceedings... S. Margherita di Pulsa: CISA, 1995.

D'ALMEIDA, M.L.O.; VILHENA, A. **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado.** 2000. São Paulo: IPT/CEMPRE.

DANTAS, E. R. B. **Análise do processo de implementação e operação do aterro sanitário no município de Puxinanã-PB utilizando o sistema de indicador de sustentabilidade Pressão-Estado-Impacto-Resposta (P-E-I-R).** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande – PB. 2013.

DEFRA - DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT FOOD & RURAL AFFAIRS. **Waste composition analysis. Guidance for local authorities.** London, 2004.

DE LAMARE NETO, A. **Resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos e de materiais granulares.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro-RJ, 2004.

DENARDIN, G. P. **Estudo dos recalques do aterro sanitário da central de resíduos do recreio – minas do leão/rs.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria - RS, 2013.

DIXON, N., JONES, V. “**Engineering properties of municipal solid waste**”, Geotextiles and Geomembranes Journal, Vol. 23, No. 3, pp. 205-233, 2005.

DGGT, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (1994). **Empfehlungen der Arbeitskreises “Geotechnik der Deponien und Altlasten”.** GDA E 1-7: Identifizierung und

Beschreibung von Abfällen (Entwurf). Bautechnik 71, Helf 9, Berlin: Wilhelm Ernst e Sohn.

EDGERS, L.; NOBLE, J.J.; E WILLIAMS. **A biologic model for long term settlement in landfills.** In: Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology, 1992, Rotherdan, The Netherlands. **Proceedings...** Rotherdan, The Netherlands: Balkema, pp. 177–184, 1992.

ELAGROUDY, S. **Predicting Bioreactor Landfill Air Space by Estimating Geotechnical Properties of Waste.** Int. J. of Thermal & Environmental Engineering Volume 5, No. 2 (2013) 129-134, 2013.

EL-FADEL, M. ; KHOURY, R. (2000) **Modeling settlement in MSW landfills: a critical review.** Critical Reviews in Environmental Science and Tecnology, 30(3), pp 327-361.

ESPINACE R., PALMA J., SÁNCHEZ-ALCITURRI J.M. **Experiencias de Aplicación de Modelos para la Determinación de los Asentamientos de Rellenos Sanitarios,** XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Foz de Iguazu, Brasil. (1999).

FAKHER, A. **Experimental study on the compaction of waste.** In: International Congress on Environmental Geotechnics, 5, 2006, Cardiff, England. Proceeding... Cardiff, 2006.

FARIAS, R. M. de S., CARIBE, R. M., ARAUJO, E.P., MONTEIRO, V. D. E. **Granulometria dos Resíduos Sólidos Urbanos do município de Campina Grande / PB** In: TERRA: Qualidade de Vida, Mobilidade e Segurança nas Cidades. 1/1 ed. João Pessoa : Editora Universitária da UFPB, 2013, v.5, p. 129-137.

FARIAS, R. M. S.; RIBEIRO, L. S.; SILVA, A. S.; ARAÚJO, E. P.; MONTEIRO, V. E. D.; **Composição Gravimétrica e Volumétrica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande/PB com base em planejamento estatístico.** IV Seminário Regional Nordeste de Resíduos Sólidos – 2º Encontro Sergipano de Resíduos Sólidos. São Cristovão – Sergipe, Agosto de 2012.

FATAHI, B. **Improving Geotechnical Properties of Closed Landfills for Redevelopment Using Fly ash and Quicklime.** PhD thesis. Faculty of Engineering and Information Technology. University of Technology Sydney. 2013.

FRANCESCHET, M.; CASTILHOS Jr., A. B.; MACCARINI, M.; PRIM, E. C. C.; FUNARI, C. **Estudos dos solos utilizados para impermeabilização da camada de base e de cobertura de aterros sanitários de Santa Catarina.** 23º Congresso Brasileiro de Engenharia sanitária e Ambiental. ABES. Campo Grande - MS, 2005.

FUCALE, S. P. **Influência dos componentes de reforço na resistência de resíduos sólidos urbanos.** Tese de doutor em Ciências em Engenharia civil apresentada no programa de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife-PE, Setembro 2005.

GARCEZ, L, R. **Estudo dos componentes tóxicos em um biorreator de resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande – PB.** 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

GONÇALVES, M. L. N. **Análise de convergência dos métodos de Gauss-Newton do ponto de vista do princípio majorante.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ, 2011.

GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; TANCREDI, G. **Contribution to a technical classification of MSW.** In: International Landfill Symposium, 5. 1995, Cagliari, Italy. Proc., p. 761-768. 1995.

HETTIARACHCHI C.H., MEEGODA J.N., TAVANTZIS J., HETTIARACHCHI, P. **Numerical model to predict settlements coupled with landfill gas pressure in bioreactor landfills.** Journal of Hazardous Materials, B139, pp. 514–522, 2007.

HETTIARACHCHI, C. H.; MEEGODA, J. N.; HETTIARACHCHI, P. **Effect of Gas and Moisture on Modeling of Bioreactor Landfill Settlement.** Journal Waste Management vol. 29: pp. 1018–1025, 2009.

HOSSAIN, M. S.; GABR, M. A. **Prediction of municipal solid waste landfill settlement with leachate recirculation**. Waste Containment and Remediation, GSP 142, ASCE, 2005.

HOSSAIN, M. S.; GABR, M. A.; BARLAZ, M. A. **Relationship of compressibility parameters to municipal solid waste decomposition**. In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 129, n. 12, pp. 1251-1158, 2003.

IBAM - Instituto Brasileiro de Administração Municipal. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. José Henrique Penido Monteiro ...[et al.]; coordenação técnica Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro, 2001.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contagem Populacional**. 2010. Disponível em: < <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=25&dados=1>>. Acesso em: 01 de julho de 2013.

ISSMFE - International Society For Soil Mechanics And Foundating Engineering. Report of the **ISSMFE Technical committee TC-5 on environmental geotechnics**. 1997.

JESSEBERGER, H. L., **Geotechnical Aspect of landfill Design and construction. Part 1: Principles and Requirements**. Proc, Instn Civ. Engrs Geotechnical Engineering, V. 107, p:99-104. 1994.

JUNQUEIRA, F. F. “**Análise do Comportamento de Resíduos Urbanos e Sistemas Dreno Filtrantes em Diferentes Escalas, com Referência ao Aterro do Jóquei Clube – Df**. Tese de Doutorado”, Universidade de Brasília, pp. 283, Brasília-DF, 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 – PB. 2008.

LING, H.I.; LESHCHINSKY, D.; MOHRI, Y. E.; KAWABATA, T. **Estimation of municipal solid waste landfill settlement.** In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 124, n. 1, pp. 21-28, 1998.

LIU, C. N.; CHEN, R. H.; CHEN, K. S. **Unsaturated consolidation theory for the prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement.** In: Waste Management & Research, v. 24, n. 1, pp. 80-91, 2006.

LOPES, M. L.; GOMES, C. C. **Problemas relativos a estabilidade de aterros de resíduos. Seminário sobre aspectos geotécnicos do projeto e construção de aterros de resíduos.** Lisboa Sociedade Portuguesa de Geotecnia; LNEC, 2000. p 1-55.

MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; VILAR, O. M. **Constitutive model for municipal solid waste.** J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2002, v.128, p. 940-951.

MACHADO S.L., VILAR O.M., CARVALHO M.F. **Constitutive Model for long term municipal solid waste mechanical behavior.** Computers and Geotechnics, vol. 35, pp. 775–790, 2008.

MANASSERO, M.; VAN IMPE, W.F.; BOUAZZA, A. **Waste disposal and containment.** pp. 1425–1474. Proc. 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japão. Balkema, v. 3. 1996.

MARIANO, M. O. H.; JUCÁ, J. F. T. **Recalques superficiais no aterro da Muribeca - valores medidos e previstos.** In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 9, 2000, Porto Seguro, BA. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2000.

MARIANO, M.O.H.; MACIEL, F.J.; FUCALE, S.P.; JUCÁ, J.F.T.; BRITO, A.R. **Composição gravimétrica e volumétrica dos RSU da célula piloto do aterro de resíduos sólidos da Muribeca.** 240 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2007.

MARQUES, A.C.M. **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos.** Tese de doutorado. EESC/USP. 2001.

MARQUES, A. C. M.; FITZ, G. M.; VILAR, O. M. **Composite compressibility model for municipal solid waste**. J. Geotech. Geoenviron. Eng., v.129, p. 372-378.2003.

MARQUES, A.C.M., VILAR, O.M., KAIMOTO, L.S. (2002). “**Compactação de Resíduos Sólidos Urbanos**”, Solos e Rochas – Revista Latino-americana de Geotecnia, ISSN0103-7021, Vol. 25, No 1, pp. 37-50, Janeiro-abril. 2002.

MASSUKADO, L. M. **Sistema de apoio à decisão: avaliação de cenários de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos domiciliares**. 2004. Dissertação (Programa de Pós – Graduação em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2004.

MAZUCHELI, J.; ACHCAR, J. A. **Algumas considerações em regressão não linear**. Acta Scientiarum. Maringá, v. 24, n. 6, p. 1761-1770, 2002

MCDOUGALL, J. R. ; PHILP, J. C. **Parametric Study of Lanfill Biodegradation Modelling: Methanogenesis & Initial Conditions**. In Proc. Sardinia 2001, 8th Intl. Waste Man. & Landfill Sump. Eds. Christensen TH, cossu R & Stegmann R, CISA, Cagliari, Vol. 1. 2001.

MEIRA R. C. **Estudo biodegradativo dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande-PB em escala experimental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

MELO, M. C. **Influência da Matéria Orgânica nos Recalques de Resíduos Sólidos Urbanos Aterrados**. 148p. Tese (Tese de doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

MELO, M. C. **Uma análise de recalques associada à biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca**. 141p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

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.

MERBACH JR., P. S. **Estudos de avaliação de metais pesados em percolado de aterro sanitário em função do tempo de disposição.** Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP. 83p. (1989).

MONTEIRO, V. E. D.; MELO, M. C.; ALCÂNTARA, P. B.; ARAÚJO, J. M.; ALVES, I. R. F. S.; JUCÁ, J. F. T. **Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos.** Engenharia Sanitária e Ambiental. v.11,n.3, p. 223-230, 2006.

MORAIS, M. C. **Estatística Computacional — Módulo 1. Notas de apoio (Cap. 1).** Secção de Estatística e Aplicações, Instituto Superior Técnico Lisboa, 2003.

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. 2007.

NEHLS, C. **A realização do plano de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos na cidade de Rio Negro, Paraná, Brasil.** Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade | vol.2 n.1 | jul - dez 2012.

OGLIARI, P. J.; PACHECO, J. A. **Análise estatística usando o STATISTICA® 6.0.** Universidade Federal de Santa Catarina - Centro Tecnológico, Departamento de informática. Florianópolis-SC, 2004.

OTSUKA , B. T. **Desenvolvimento de modelo hiperbólico com processo de Biodegradação acoplado para previsão do comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná. CURITIBA - 2010.

OUVRY, J. F., PAGE, B. **Settlement of waste package in chaffs in a domestic waste disposal.** In: International Workshop Hydro – Physico - Mechanics Of Landfills, Grenoble, France, 2005. **Proceedings...** Grenoble: Grenoble University, 2005.

PAIVA, W. **Aplicação da Estatística Para Descrever um Comportamento de um Solo Expansivo.** Tese de Doutorado pela Universidade Federal de Pernambuco-UFPE programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil em Geociências. Recife PE. 2009.

PEREIRA, A. G. H. **Compresibilidad de los residuos sólidos urbanos.** Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, Espana - 2000.

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 Nordeste de Resíduos Sólidos. 2010.

PEREIRA, S. S.; MELO, J. A. B. **Gestão dos resíduos sólidos urbanos em Campina Grande/PB e seus reflexos socioeconômicos.** Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional. G&DR - v. 4, n. 4, p. 193-217, Taubaté, SP, Brasil, setembro/2008.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PMCG - PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINA GRANDE. **Projeto do Aterro Sanitário de Campina Grande/PB.** Campina Grande: junho de 2002.

QUIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. **Geotechnical aspects of landfill design and construction.** New Jersey: Prentice Hall, 2001, 768 p.

RIBEIRO, L. S. **Estudo da degradação dos resíduos sólidos urbanos através dos parâmetros físicos e físico- químicos em um biorreator de escala experimental.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande – PB. 2012.

ROCHA, E. F. **Determinação da condutividade Hidráulica e da Capacidade de campo de Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, 2008.

ROCHA, G. H. T.; LANG, L. C. **Determinação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares - ênfase nos resíduos domésticos potencialmente perigosos**. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Joinville – SC, 2003.

RODRIGUES, C. F. **Análise do potencial de reciclagem dos resíduos sólidos urbanos: viabilidade socioeconômica de cooperativas de catadores do município de Campina Grande – PB**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande – PB. 2013.

RODRIGUES, M. I. ; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 2a. Ed. Campinas, SP: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009.

SAKAMOTO, Y.; ISHIGURO, M.; KITAGAWA, G. **Akaike Information Criterion Statistics (Mathematics and its Applications)**. ISBN-10:9027722536. ISBN-13:978-9027722539. Publisher: Springer; 1986.

SANCHES, I. J.; FURLAN, D. C. **Métodos Numéricos**. Universidade Federal do Paraná Departamento de Informática. Curitiba, 2007.

SANTI, L. J.; TOMMASELLI, J. T. G. **Estudo da permeabilidade do solo no entorno de lagoas de tratamento de esgoto da região de presidente prudente/sp**. IN: XXI Congresso de Iniciação Científica da UNESP. São José do Rio Preto, 2009.

SCHULER, A. R. **Análise do Comportamento de um Aterro Municipal de Resíduos Sólidos Urbanos Instrumentado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ, 2010.

SILVA, A. S. **Avaliação da toxicidade dos Resíduos Sólidos Urbanos da cidade de Campina Grande-PB** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande – PB. 2012.

SILVEIRA, A. M. M. **Estudo do Peso Específico de RSU**. Tese de Doutorado Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ - Rio de Janeiro, 2004.

SIMÕES, G. F. **Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2000. 136 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical Methods**. ISBN-10: 0813815614. ISBN-13: 978-0813815619. Publisher: Iowa State University Press. 8 edition, 1989.

SOARES, E. L. de S. F. **Estudo da Caracterização Gravimétrica e Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação (mestrado) – Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

SOUZA, V. O. A. **Simulação do Fluxo Vertical em Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação (mestrado) – Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

SOWERS, G. F.; **Settlement of waste disposal fills**. In: eighth international conference on soil mechanics and foundation engineering. Moscow, 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 de Doutorado – Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil, UnB. 2009.

TAYLOR, D. **Fundamentals of Soil Mechanics**. New york: John Wiley & Sons, 1948.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., VIGIL, S.A., **Integrated Solid Waste Management -Engineering Principles and Management Issues**. McGraw-Hill International Editions. ISBN 0-07-063237-5. 978p. 1993.

TERZAGHI K., PECK R.B. **Soil mechanics in engineering practice**. John Wiley & Sons, New York, 1948.

YEN, B. C., SCANLON, B. **Sanitary landfill settlement rates**. Journal of engineering division, 1975.

WEI, W. **A new model for settlement process of closed municipal solid waste landfill**. EJGE, 2012. v. 17, p. 948-957, 2012.

VAN ELK, A. G. H. P. **Redução de emissões na disposição final / Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL aplicado a resíduos sólidos**. Coordenação de Karin Segala – Rio de Janeiro: IBAM, 2007.

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

VARGAS, M.. **Introdução a Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977.

VIEIRA NETO, J. M., **Estudo do Comportamento de Metais em uma Célula Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos Na Cidade De Campina Grande – PB** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande – PB. 2012.

WALL D.K. & ZEISS C., **Municipal Landfill Biodegradation and Settlement**. ASCE J. of Env. Eng., Vol. 121, Nº 3, pp. 214-223, 1995.