



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRAULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

JOÃO PEDRO RODRIGUES GARCIA

ANÁLISE DE ÍNDICES FÍSICOS E PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE
ATERROS SANITÁRIOS DA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

FORTALEZA

2020

JOÃO PEDRO RODRIGUES GARCIA

ANÁLISE DE ÍNDICES FÍSICOS E PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE
ATERROS SANITÁRIOS DA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Ambiental da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Anderson
Borghetti Soares

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G199a Garcia, João Pedro Rodrigues.

Análise de índices físicos e propriedades geotécnicas de aterros sanitários da região nordeste do Brasil / João Pedro Rodrigues Garcia. – 2020.

81 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

1. Índices físicos. 2. Mecânicas. 3. Aterro sanitário. I. Título.

CDD 628

JOÃO PEDRO RODRIGUES GARCIA

ANÁLISE DE ÍNDICES FÍSICOS E PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE
ATERROS SANITÁRIOS DA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Ambiental da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Anderson
Borghetti

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anderson Borghetti (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Mariana Vela Silveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Saulo e Beatriz

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Anderson Borghetti pela orientação exemplar, por, ao longo do curso, despertar meu interesse na área de geotécnica ambiental devido a sua notória didática e experiência profissional na área.

Aos Professores Doutores participantes da banca examinadora Ronaldo Stefanutti e Mariana Vela Silveira pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus pais, Saulo e Beatriz, por todo o apoio e suporte ao longo da minha jornada, por sempre acreditarem em mim e, principalmente, por vibrarem com minhas vitórias.

À Manu, por sempre torcer por todos os meus sonhos, por sempre me dá suporte diante de todas as minhas dúvidas e dificuldades, por sua paciência e didática em repassar seus conhecimentos e experiência. Sua presença foi fundamental para que minha caminhada se tornasse mais leve e feliz e seu exemplo foi fundamental para que eu me tornasse uma pessoa melhor no âmbito profissional e pessoal.

Aos amigos feitos durante o curso que, hoje, representam uma família da qual tenho orgulho de levar comigo ao longo da vida e que foram peças chave para momentos únicos vividos: Yan Sucupira, Isabelly Paz, João Paulo Albuquerque, Juliane Carvalho, Patrícia Stadler, Ícaro Abreu, Andrey Marcos, Pedro Cavalcante, João Batista Magalhães, Paulo César Martins, Camila Damasceno e Mariana Pinheiro

À Andréa Gisele e ao Jefferson Hannover por terem contribuído significativamente com meus conhecimentos, por serem pessoas dispostas a ajudar e compartilhar experiências e que são amigos excepcionais que sei que serão profissionais exemplos.

À Ciclo Jr, empresa júnior do curso de Engenharia Ambiental, por todo o fornecimento de conhecimento e experiências possíveis da minha área. A minha participação na empresa foi crucial para minha alavancagem profissional.

Por fim, gostaria de agradecer a Deus e Nossa Senhora por todas as bênçãos ao longo da minha jornada.

Resumo

Atualmente, a geração de resíduos é uma problemática que afeta diversas esferas da sociedade, já que está diretamente relacionada com fatores ambientais, patológicos e econômicos. Aterros sanitários são estruturas destinadas a receber os resíduos sólidos urbanos e devem ser projetados levando em consideração as propriedades mecânicas do solo. Esta pesquisa teve como objetivo coletar e analisar dados das propriedades físicas dos resíduos sólidos urbanos de aterros sanitários da região nordeste e estas propriedades englobaram dados de composição, de índices físicos e de propriedades geotécnicas de aterros da região Nordeste do Brasil. Tais dados foram obtidos através de pesquisa bibliográfica, de aterros sanitários ativos ou desativados, e as informações foram organizadas para utilização em trabalhos futuros relacionados ao tema. As principais fontes para se obter as informações foram os repositórios das universidades federais, onde foram coletadas informações sobre os índices físicos dos resíduos sólidos urbanos e propriedades mecânicas de aterros sanitários como, teor de umidade, composição gravimétrica, peso específico e de distribuição granulométrica. Dados sobre as propriedades geotécnicas, também foram obtidos, porém de forma mais escassa. Os dados de cada aterro foram analisados e comparados. Verificou-se que havia uma variação entres os percentuais de matéria orgânica e uma dependência de fatores como tempo de deposição e nível econômico local. Com relação a resistência, propriedade essencial para a avaliação de estabilidade de taludes, observou-se uma relação entre o intercepto coesivo e o teor de compostos depositos nas células.

Palavras chave: Índices Físicos. Mecânicas. Aterro Sanitário.

Abstract

Currently, the generation of waste is a problem that affects several spheres of society, since it is directly related to environmental, pathological and economic factors. Sanitary landfills are structures designed to receive solid urban waste and must be designed taking into account the mechanical properties of the soil. This research aimed to collect and analyze data on the physical properties of urban solid waste from landfills in the Northeast region and these properties included data on composition, physical indexes and geotechnical properties of landfills in the Northeast of Brazil. Such data were obtained through bibliographic research, active or deactivated landfills, and the information was organized for use in future works related to the theme. The main sources for obtaining the information were the repositories of federal universities, where information was collected on the physical indices of urban solid waste and the mechanical properties of landfills, such as moisture content, gravimetric composition, specific weight and particle size distribution. Data on geotechnical properties have also been obtained, however more sparingly. The data for each landfill was analyzed and compared. It was found that there was a variation between the percentages of organic matter and a dependence on factors such as time of deposition and local economic level. Regarding resistance, an essential property for the assessment of slope stability, a relationship was observed between the cohesive intercept and the content of compounds deposited in the cells.

Keywords: Physical Indices. Mechanical Properties. Landfil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Estufa de Secagem com Circulação Forçada	20
Figura 2	– Consolidômetro.....	30
Figura 3 a)	– Região Nordeste do Brasil.....	33
Figura 3 b)	– Estados da Região Nordeste.....	33
Figura 4	– Vista Superior do ASMOC.....	35
Figura 5	– Fotografia do Aterro Metropolitano Centro.....	36
Figura 6	– Célula no Aterro Sanitário de Muribeca.....	37
Figura 7	– Vista Via Satélite do Aterro Sanitário de Altinho.....	38
Figura 8 a)	– Composição Gravimétrica dos RSU da Célula S-1.....	40
Figura 8 b)	– Composição Gravimétrica dos RSU da Célula S-2.....	40
Figura 9	– Separação Manual dos RSU.....	42
Figura 10	– Caracterização dos Resíduos no ASMJP.....	45
Figura 11 a)	– Quarteamento Final.....	46
Figura 11 b)	– Separação em duas partes para Seleção de Análise.....	46
Figura 12 a)	– Equipamento Utilizado no Ensaio.....	52
Figura 12 b)	– Escavação da Vala.....	52
Figura 12 c)	– Ensaio para Obtenção do Peso Específico	52
Figura 13	– Retroescavadeira Usada para Retirada de Resíduo.....	54
Figura 14	– Preparação das Amostras.....	57
Figura 15	– Localização do CTR Iragassu e do Aterro Sanitário de Muribeca..	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Geração de RSU Per Capta	16
Gráfico 2 – Geração de Resíduos da Região Sudeste do Brasil.....	17
Gráfico 3 – Distribuição Granulométrica ao longo do Tempo no Aterro Bandeirantes	26
Gráfico 4 – Relação Tensão-Deformação típica dos RSU.....	27
Gráfico 5 – Curva de Compactação dos RSU.....	29
Gráfico 6 – Ensaio de Infiltração no Aterro Bandeirantes.....	31
Gráfico 7 – Composição Gravimétrica ASMOC.....	41
Gráfico 8 – Composição Gravimétrica de Muribeca.....	47
Gráfico 9 – Redução de Matéria Orgânica no Aterro Sanitário Santo Tirso.....	48
Gráfico 10 – Curva Granulométrica dos RSU.....	55
Gráfico 11 – Curva Granulométrica de RSU novos e antigos.....	56
Gráfico 12 – Curva Granulométrica com e sem Defloculante.....	58
Gráfico 13 – Curvas de Tensão de Cisalhamento x Deslocamento Horizontal.....	59
Gráfico 14 – Envoltórias de Resistência para Diferentes Níveis de Deslocamento Horizontal.....	60
Gráfico 15 – Curvas de tensão-Deformação para Amostras de RSU Novos.....	61
Gráfico 16 – Curvas de tensão-Deformação para Amostras de RSU Antigos.....	62
Gráfico 17 – Envoltórias de Resistência para Diferentes Níveis de Deslocamento Horizontal.....	64
Gráfico 18 – Porcentagem de Papel/Papelão dos Aterros.....	65
Gráfico 19 – Porcentagem de Matéria Orgânica dos Aterros.....	66
Gráfico 20 – Porcentagem de Plástico dos Aterros.....	67
Gráfico 21 – Porcentagem de Metal dos Aterros.....	68

Gráfico 22 – Composição entre Pesos Específicos.....	69
Gráfico 23 – Percentuais de Passagem na Peneira de nº 200.....	70
Gráfico 24 – Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento dos Aterros.....	71
Gráfico 25 – Comparativo entre os Percentuais de Plástico e os Valores de Coesão.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Teor de Umidade dos Componentes.....	21
Tabela 2	– Composição Gravimétrica dos RSU em Cidades do Brasil	22
Tabela 3	– Composição Gravimétrica dos RSU em Cidades do Mundo.....	23
Tabela 4	– Ranking de países segundo IDH.....	23
Tabela 5	– Pesos específicos para aterros sanitários do Rio de Janeiro.....	24
Tabela 6	– Parâmetros de Resistência para Diferentes Níveis de Deslocamento Horizontal.....	28
Tabela 7	– Composição Gravimétrica ASMOC.....	40
Tabela 8	– Composição Gravimétrica ASMC.....	43
Tabela 9	– Metodologia MODECOM.....	44
Tabela 10	– Composição gravimétrica ASMJP.....	45
Tabela 11	– Comparativo da Composição Gravimétrica com Diferença de 10 Anos.....	48
Tabela 12	– Categorias e Subcategorias de RSU.....	50
Tabela 13	– Composição Gravimétrica dos Municípios do COMAGSUL.....	51
Tabela 14	– Pesos Específicos das Partículas Sólidas dos RSU do ASMC.....	53
Tabela 15	– Pesos Específico Aparente Seco e Umidade Ótima.....	54
Tabela 16	– Resumo dos Resultados de Caracterização Física.....	58
Tabela 17	– Coesão e Ângulo de Atrito de acordo com o deslocamento Horizontal.....	60
Tabela 18	– Parâmetros de Resistência das Amostras de RSU Novos e Antigos.....	62
Tabela 19	– Parâmetros de Resistência para Diferentes Níveis de Deslocamento Horizontal.....	64
Tabela 20	– Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento dos Aterros.....	71

Tabela 21 – Parâmetros de Resistência ao Longo do Tempo.....	73
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACFOR	Autarquia de Regulamentação, Fiscalização e Controle dos Serviços Públicos de Saneamento Ambiental
ASMC	Aterro Sanitário Metropolitano Centro
ASMJP	Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa
ASMOC	Aterro Sanitário Metropolitano Oeste Caucaia
ASTRAMARE	Associação dos Trabalhadores de Materiais Recicláveis
CEE	Comunidade Econômica Europeia
CODIAM	Consórcio de Desenvolvimento Intermunicipal da Área Metropolitana de João Pessoa
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CRA	Centro de Recursos Ambientais
EMLURB	Empresa Municipal de Limpeza Urbana
GRS	Grupo de Resíduos Sólidos
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
Kg	Quilogramas
KPA	Quilo pascal
LIMPURB	Empresa de Limpeza Urbana de Salvador
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

LISTA DE SIMBOLOS

γ	Peso Específico
γ_s	Peso Específico Aparente Seco
m	Massa
q	Vazão de Percolação
A	Área de Percolação
k	Constante de Permeabilidade
i	Gradiente Hidráulico
c'	Coesão
w	Umidade
ϕ	Ângulo de Atrito

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS.....	18
2.1	Objetivos Gerais	18
2.2	Objetivos Específicos.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	Propriedades Índices	20
3.1.1	<i>Teor de Umidade</i>	20
3.1.2	<i>Composição Gravimétrica</i>	21
3.1.3	<i>Peso Específico</i>	23
3.1.4	<i>Distribuição Granulométrica</i>	25
3.2	Propriedades Geotécnicas.....	26
3.2.1	<i>Resistência ao Cisalhamento</i>	26
3.2.2	<i>Compactação</i>	28
3.2.3	<i>Compressibilidade</i>	29
3.2.4	<i>Permeabilidade</i>	30
4	METODOLOGIA.....	33
4.1	Regiões e Locais de Estudo.....	33
4.2	Coleta de Dados.....	37
4.2.1	<i>Composição Gravimétrica</i>	39
4.2.2	<i>Peso Específico</i>	51
4.2.3	<i>Distribuição Granulométrica</i>	55
4.2.4	<i>Resistência ao Cisalhamento</i>	58
5	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	65
5.1	Composição Gravimétrica.....	65
5.2	Peso Específico.....	69
5.3	Distribuição Granulométrica.....	70
5.4	Resistência ao Cisalhamento.....	71
6	CONCLUSÕES.....	74

1. Introdução

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são classificados pela NBR 10004 como classe II A, o que significa que são não perigosos e não inertes, fato que define a sua disposição final em aterros sanitários, estruturas projetadas com o objetivo de conter e confinar os resíduos sólidos, levando-se em consideração padrões para a segurança.

Segundo Zanta e Ferreira (2003), RSU são aqueles produtos resultantes de diversas atividades em áreas com aglomerações humanas dos municípios, tendo origens: comercial, residencial, industrial, de estabelecimentos da área da saúde, da limpeza pública, da construção civil e, por fim, de atividades agrícolas.

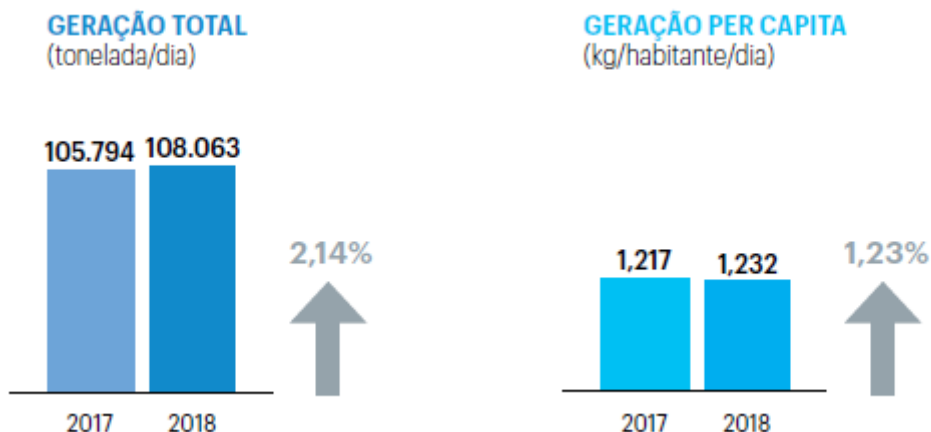
No Brasil, os aterros sanitários de Bandeirantes e Sítio São João, ambos localizados no estado de São Paulo, foram os pioneiros no Brasil e suas construções se iniciaram na década de 1990. O aterro Bandeirantes deixou de receber resíduos no ano de 2007 quando atingiu sua capacidade máxima e atingiu o fim da sua vida útil. São Paulo é o estado brasileiro que mais produz resíduos e está situado na região sudeste, que é a região que mais gera resíduos no Brasil (o gráfico 1 mostra a geração per capita em kg/hab./dia), sendo cerca de 108.063 toneladas por dia (Panorama Abrelpe, 2018). Tal quantidade demonstra como o controle no armazenamento de resíduos é essencial para se evitar problemas de cunho ambiental e social, principalmente, com a crescente geração, como mostra o gráfico 2.

Gráfico 1 - Geração de RSU Per Capta



Fonte: Abrelpe, 2018

Gráfico 2 - Geração de Resíduos na Região Sudeste do Brasil



Fonte: Abrelpe, 2018

Em 2017, o aterro sanitário de Meethotamulla, situado no Sri Lanka, sofreu um deslizamento da sua pilha de 90 metros de resíduos soterrando mais de 180 moradias nas proximidades. Ocorridos como esse reforçam as necessidades da gestão e controle, nos aterros sanitários, dos parâmetros geotécnicos, para se evitar acidentes.

A má gestão de aterros sanitários de resíduos sólidos pode causar, além de problemas sociais como o citado acima, danos ambientais como foi o caso do aterro sanitário de Alagoinhas no Nordeste da Bahia que teve uma gestão ausente durante um período de oito meses, fato que acarretou a poluição do lençol freático do Aquífero São Sebastião, fonte hídrica de empresas da região. A causa maior para ocorrência do dano foi a disposição inadequada dos resíduos no solo, contaminando-o cerca de 5 metros de profundidade da camada de solo (CORREIO 24 horas, 2018).

Ter conhecimento das propriedades geotécnicas dos RSU e dos demais materiais que compõe o aterro (camadas de cobertura, drenagem, impermeabilização, etc.) é essencial para se evitar problemas socioambientais. Por este motivo é necessária a realização de pesquisas que gerem este tipo de informação dos aterros sanitários, que auxiliarão na gestão dos mesmos.

2. Objetivos

2.1 Objetivos Gerais

Coletar e organizar um conjunto de dados a respeito de parâmetros geotécnicos de aterros sanitários da região nordeste do Brasil, a fim de gerar um banco de dados em um documento que otimize a consulta das informações que possam ser utilizadas como referência para futuros trabalhos.

2.2 Objetivos Específicos

- Pesquisa bibliográfica de indicadores físico mecânicos dos solos de fundação de aterros sanitários do nordeste do Brasil;
- Analisar diferenças e semelhanças entre os indicadores da região;
- Traçar comparativos entre os parâmetros geotécnicos de diferentes aterros sanitários por meio de gráficos e tabelas.

3. Revisão Bibliográfica

Os aterros sanitários são estruturas destinadas para contenção de resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo unidades sujeitas a grandes deformações, quando comparados com maciços de solos, devido à natureza heterogênea dos seus componentes. Esta diminuição dos vazios é causada devido as tensões aplicadas nas camadas sobrejacentes dos RSU, devido ao peso próprio, e a degradação contínua da matéria orgânica presente na composição do RSU. O controle da drenagem dos produtos gerados no aterro (chorume e gás) é de extrema importância para a segurança do maciço. O dimensionamento de estruturas para esta finalidade depende da obtenção de propriedades índices e geotécnicas do aterro que são obtidas em testes laboratoriais e de campo.

As propriedades índices dependem do tipo de RSU, que variam de composição de acordo com o local de origem. São propriedades que estão relacionadas ao comportamento hidromecânico e relacionadas a degradação do RSU, tais como, o *teor de umidade*, que varia de acordo com a localização, tipo de resíduo, pluviometria, etc; a *composição gravimétrica*, que se refere a porcentagem em peso de cada material do RSU; o *peso específico* (peso do RSU por unidade de volume) e a *distribuição granulométrica* (determina o tamanho das partículas).

Com relação as propriedades geotécnicas, referem-se à *resistência* do maciço sanitário, caracterizada pelos parâmetros de resistência que englobam a coesão e o ângulo de atrito; a *compactação* dos resíduos, que definem as condições densidade inicial; pela compressibilidade, que se refere as deformações que ocorrerão no maciço ao longo do tempo e pela *permeabilidade* que se refere ao escoamento de líquidos entre os vazios do resíduo.

3.1 Propriedades Índices

3.1.1 Teor de umidade

O teor de umidade é uma propriedade física com relevância em aterros sanitários de RSU pois este tem relação com as velocidades de modificações biológicas (biodegradação), previsões a respeito da geração de líquidos percolados e gases e a geração de poropressões. Além disso, a determinação do teor de umidade em RSU está diretamente relacionada a velocidade de degradação de materiais putrescíveis, logo, composição inicial dos RSU e os fatores climáticos podem ser características determinantes para um teor de umidade in situ (CARNEIRO, 2013, pg.30).

Não há ensaio normatizado para a determinação do teor de umidade dos RSU, já que sua determinação é muito difícil, pois seus diversos componentes têm diferentes teores de umidade. Porém, há a utilização de ensaios com estufa de exaustão forçada (Figura 1), que elimina o mau cheiro dos resíduos a uma temperatura de 70°C para que não se perca nenhum material volátil. Neste método, há a relação entre a massa de resíduos pesada inicialmente e a massa de resíduos pesada posteriormente a utilização da estufa para a secagem (NASCIMENTO, 2007, pág.88).

Figura 1 - Estufa de Secagem com Circulação Forçada



Fonte: Nascimento, 2007

No contexto nacional, Carvalho (1999) encontrou valores para o teor de umidade entre 50% e 100% no Aterro Bandeirantes, em São Paulo. Além

disso, a sua pesquisa obteve diversos valores de teor de umidade para diferentes componentes do maciço, como pode ser verificado na tabela 1.

Tabela 1 - Teor de Umidade dos Componentes

Componentes	Umidade (%)	
	Base seca	Base úmida
Metais	19,6	16,4
Papel	74,8	42,8
Vidro	5,9	5,57
Plástico	41,5	29,3
Borracha	24,5	19,6
Têxteis	55,0	35,5
Pedra	12,6	11,2
Madeira	69,8	41,1
Pasta Orgânica	47,0	32,0

Fonte: Carvalho, 1999

Vale ressaltar que na base úmida dos resíduos a umidade é considerada na composição centesimal diferente do que ocorre na base seca. Além disso, na base seca o peso da água é relacionado com o peso seco e não o peso total, como considerado na base úmida.

3.1.2 Composição Gravimétrica

Essa propriedade em questão é bastante variável quando comparada em diferentes regiões do Brasil, pois ela depende de fatores como, desenvolvimento social, econômico e hábitos culturais. Basicamente, ela determina as quantidades em peso dos diferentes materiais que compõe uma amostra de RSU, ou seja, a composição define as porcentagens de plástico, vidro, metal e de outros componentes que estão presentes na amostra (OLIVEIRA, 2011 apud CARNEIRO, 2013).

Segundo Boscov (2008) quanto maior a quantidade de determinado material presente no aterro sanitário de RSU, mais o maciço terá características semelhantes à desse componente. Por exemplo, quanto maior o teor de materiais putrescíveis, maior será a geração de chorume e gás, fato que influenciará na geração de poropressões no interior do maciço.

Com relação ao teor de putrescíveis, vale ressaltar que há uma relação inversa com o desenvolvimento econômico das cidades. Há estudos comparativos que comprovam que quanto maior o desenvolvimento econômico e o nível educacional da população, menor é a geração de materiais putrescíveis (BOSCOV, 2008).

Tabela 2 - Composição Gravimétrica dos RSU em Cidades do Brasil

COMPONENTE	CURITIBA ¹	FORTALEZA ¹	MACEIÓ ¹	PORTO ALEGRE ¹	RECIFE ³	RIO DE JANEIRO ⁴	SALVADOR ⁵	SÃO PAULO ⁶
Materiais putrescíveis	66	66	50	74	60	63	70	58
Papel/papelão	3	15	16	11	15	14	16	13
Plástico	6	8	13	6	8	15	10	16
Metal	2	5	3	4	2	2	1,5	2
Madeira/ couro/vidro/ borracha/ outros	23	6	18	5	15	6	2,5	11

Fonte: Boscov, 2008

A tabela 2 mostra como a quantidade de materiais putrescíveis é elevada nas cidades Brasileiras, variando pouco entre as mesmas, fato que demonstra uma certa semelhança na geração de resíduos nessas cidades. Quando avaliamos em cidades de diferentes países, comprovamos a relação entre o nível econômico e a geração de resíduos putrescíveis, conforme pode ser visualizado na tabela 3, onde nota-se uma diferença significativa da geração desse tipo de resíduo entre as cidades como Cochabamba, na Bolívia, e Nairóbi, no Quênia, em comparação com Nova York, nos Estados Unidos e Genebra, na Suíça, por exemplo. Podemos ainda, analisar a geração dos resíduos orgânicos com base na pesquisa de Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) mundial do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), no ano de 2014, conforme mostra a tabela 3, que comprova que as cidades com maior quantidade de materiais putrescíveis se localizam em países de menor IDH.

Tabela 3 - Composição Gravimétrica dos RSU em Cidades do Mundo

COMPONENTES	PEQUIM	GENEVA	NOVA YORK	NAIRÓBI	LOCHA-BAMBA	ISTAMBUL	ATENAS
Materiais putrescíveis	45	28	20	74	71	61	59
Papel/papelão	5	31	22	12	2	10	19
Plástico	1	9,5	-	5	3	3	7
Madeira/couro/borracha	7	4	3	-	1	6	4
Metal	1	2,5	5	3	1	2	4
Vidro	1	9	6	4	1	1	2
Outros	40	16	44	2	21	17	5

Fonte: Boscov, 2008

Tabela 4 – Ranking de países segundo IDH

Ranking Mundial	Países	IDH
3	Suíça	0,93
8	Estados Unidos	0,915
29	Grécia	0,865
72	Turquia	0,761
90	China	0,727
119	Bolívia	0,662
145	Quênia	0,548

Fonte: PNUD, 2014

3.1.3 Peso Específico

O peso específico é uma propriedade de difícil determinação para RSU. No entanto, esta propriedade pode ser obtida pela escavação de poços, onde o material escavado é pesado e o volume da escavação é determinado através do preenchimento da mesma com água, sendo previamente impermeabilizada com manta sintética. As dimensões da escavação devem ser suficientemente grandes, devido ao tamanho dos diferentes componentes dos resíduos, de modo a obter um valor de densidade mais representativo do local de medição. No entanto não há um padrão quanto as dimensões, em geral na literatura mostra a utilização de dimensões em torno de 0,5 metro de arestas da

escavação (largura, comprimento e profundidade) (MARQUES, 2001). Vale ressaltar que, ao longo do tempo, o peso específico tende a aumentar já que há um processo de sobreposição de camadas (sobrecarga) em aterros sanitários ao longo do tempo. Tal fator eleva as condições de adensamento e compressão. (CARNEIRO, 2013). A expressão do peso específico é dada por:

Equação 1 – Peso específico

$$\gamma = \frac{P}{V}$$

Onde, γ = *Peso específico da amostra (kgf.m-3)*

m = *Massa da amostra (kgf)*

v = *Volume da amostra (m³)*

Fonte: BOSCOV, 2008

O peso específico depende de diversos fatores como, do grau de compactação, composição gravimétrica, distribuição granulométrica e do grau de degradação. Este último fator tem uma importância significativa, pois com o decorrer do tempo, há transformação do material orgânico do maciço em líquido e gás que serão drenados e o material sólido restante tem características bem diferentes do material original (BOSCOV, 2008, PÁG.37).

Miranda (2004) obteve valores de peso específico em diferentes aterros municipais do estado do Rio de Janeiro que são apresentados na tabela 5. Sua conclusão foi que o maior valor deste índice físico em Gramacho está relacionado com o uso de equipamentos compactadores em melhor estado, compactação realizada de forma controlada, de forma a se obter um valor ótimo, e uma maior organização operacional em comparação com os municípios de Paracambi e Nova Iguaçu.

Tabela 5 - Pesos específicos para aterros sanitários do Rio de Janeiro

Aterro	Estado	Peso Específico (kN/m³)
Paracambi	Rio de Janeiro	16,5
Gramacho	Rio de Janeiro	19,74
Nova Iguaçu	Rio de Janeiro	9,15

Fonte: Miranda, 2004

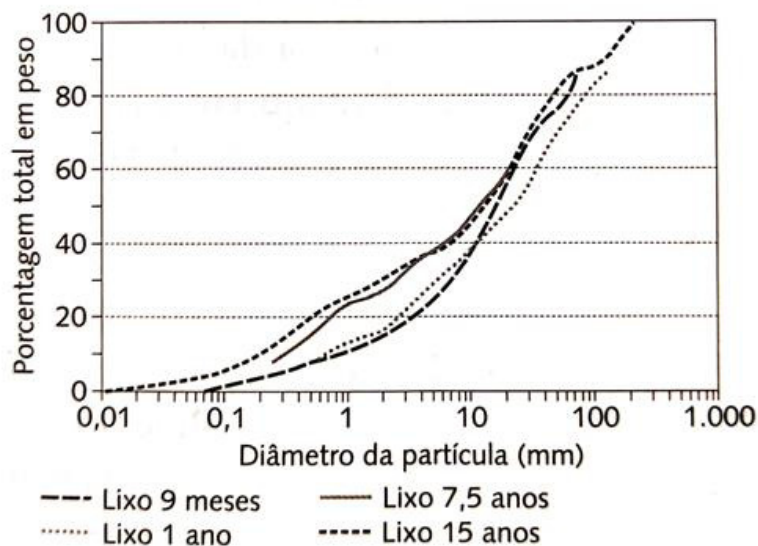
3.1.4 Distribuição Granulométrica

Dados da literatura nacional mostram que os RSU são compostos predominantemente por materiais granulares, havendo também presença de material fino (cerca de 20%). Para a determinação da granulometria dos RSU utiliza-se o método da análise clássica (CALLE, 2007).

Para a determinação da distribuição granulométrica dos resíduos sólidos urbanos usam-se as recomendações da NBR 7181 (ABNT, 2017, Corrigida) que também é usada para solos, no qual o processo se baseia pelo peneiramento ou pela combinação peneiramento e sedimentação. Alguns dos aparelhos necessários para a tal análise são: estufa, balança, aparelho de dispersão, densímetro, agitador mecânico e peneiras de dimensões pré-selecionadas.

A distribuição granulométrica varia ao longo da idade do maciço de lixo, pois com o passar do tempo, o material granular se torna fino e pastoso devido a biodegradação do material putrescível (BOSCOV, 2008, pág.39). O gráfico 3 mostra a modificação da curva granulométrica dos resíduos sólidos urbanos ao longo do tempo, no aterro Bandeirantes, em São Paulo. Se analisarmos a porcentagem de finos (abaixo da peneira #200 - diâmetro 0,075mm), após 15 anos, nota-se que a porcentagem de finos passou de 0% (resíduo novo) para 5% (resíduo após 15 anos) de finos. Nota-se também uma curva mais acentuada e mais próxima dos menores diâmetros de partículas quando se analisa tempos maiores de confinamento do resíduo.

Gráfico 3 - Distribuição Granulométrica ao Longo do Tempo no Aterro Bandeirantes



Fonte: Boscov, 2008

3.2 Propriedades Geotécnicas

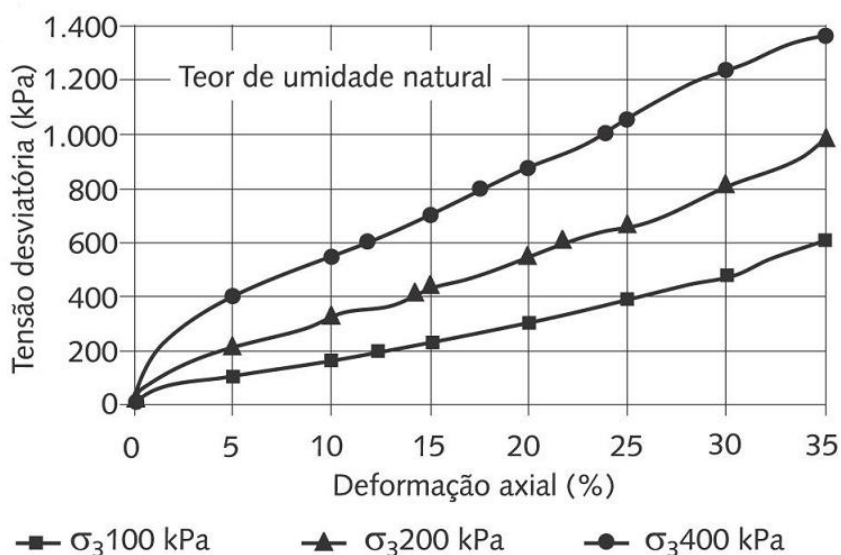
3.2.1 Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento de um material poroso é definida em função dos seus parâmetros de resistência, que são o ângulo de atrito e o intercepto de coesão. O primeiro é definido como o ângulo de inclinação da reta que tangencia as envoltórias de ruptura, enquanto o segundo corresponde ao cruzamento desta reta com o eixo das tensões de cisalhamento. Vale ressaltar que os parâmetros de resistência são obtidos segundo o critério de Mohr-Coulomb a partir de ensaios triaxiais ou cisalhamento direto ou por meio de ensaios realizados in situ. (CARVALHO, 2013, pág. 47)

A obtenção de tais parâmetros permite a estimar o comportamento de tensão-deformação dos resíduos sólidos, fato que é essencial para se prever valores de resistência dos taludes e, conseqüentemente, adequar aos padrões de segurança (CARVALHO, 2013, pág. 46).

Segundo Boscov (2008), os RSU no estado inicial de disposição não apresentam coesão, pois são basicamente granulares. Quando corpos de prova de RSU são submetidos ao aumento das tensões desviadoras em ensaios triaxiais, exibem aumento das deformações sem apresentar um ponto de ruptura definida, como pode ser visto no gráfico 4, e a determinação dos parâmetros de resistência deve ser feita a partir da definição de uma deformação (deslocamento axial) específica arbitrada.

Gráfico 4 - Relação Tensão-Deformação Típica dos RSU



Fonte: Boscov, 2008 apud Vilar et al, 2006

O gráfico 4 mostra as curvas de tensão desviadora em função da deformação axial que foram obtidas de ensaios de compressão triaxial para RSU provenientes de aterros sanitários nacionais. Nele percebemos que, diferente dos solos, a tensão desviadora tende a aumentar mesmo para altas deformações (BOSCOV, 2008 apud VILAR et al, 2006)

Motta (2011) em sua pesquisa sobre os parâmetros de resistência dos RSU, coletou amostras residenciais da cidade de Recife/PE, que foram utilizadas em ensaios de cisalhamento direto, sendo obtidos os seguintes valores mostrados na tabela 6:

Tabela 6 - Parâmetros de Resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal

PARÂMETROS	NÍVEIS DE DESLOCAMENTO			
	5%	10%	15%	20%
c' (kPa)	13,3	16,5	22,6	34,3
ϕ' (°)	22	28	30	28
R ²	0,948	0,998	0,992	0,971

Fonte: Motta, 2011

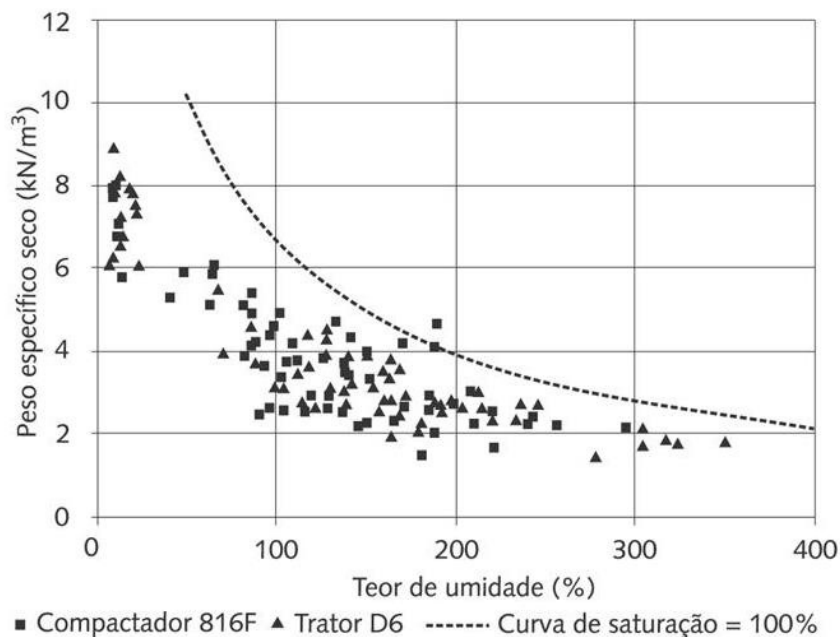
Os valores apresentados na tabela 6 indicam que o intercepto coesivo aumenta à medida que o deslocamento aumenta, enquanto que os valores do ângulo de atrito aumentam até 15% de deslocamento e tendem a uma constância a partir dos 10% de deslocamento horizontal.

3.2.2 Compactação

A compactação dos RSU no Brasil ocorre por meio de tratores de esteira e rolos compactadores tendo como etapas do processo: descarga dos resíduos por caminhões; empilhamento e compactação efetiva.

Marques (2001) obteve curvas de compactação para os resíduos de aterros sanitários brasileiros, a partir de um aterro experimental de RSU, e observou que não há semelhança com as curvas de compactação obtidas para os solos e tal comportamento parece ser função do teor de matéria orgânica, que nos aterros sanitários nacionais é elevado. Comprova-se no gráfico 5 que quanto mais seco for os RSU mais eficiente será a compactação por obter maiores valores de peso específico seco.

Gráfico 5 - Curva de Compactação dos RSU



Fonte: Marques, 2001

3.2.3 Compressibilidade

A compressibilidade pode ser definida como a capacidade de redução volumétrica de um corpo devido a atuação de pressões. No caso dos RSU, estes sofrem recalques que elevam a vida útil do aterro em virtude da redução volumétrica. É notório a importância da compressibilidade em aterros sanitários já que por meio dela pode-se avaliar a integridade de vários elementos que compõe um aterro, como: sistema de drenagem e camadas de cobertura final (CARVALHO, 2013, pág 37).

Segundo Carvalho (2013), os recalques de aterros sanitários de RSU chegam a ser entre 10% a 30% da altura original devido a seu próprio peso. Boscov (2008) enumera alguns fatores que são responsáveis pelo fenômeno do recalque em aterros sanitários de RSU, como: a biodegradação e degradação, *creep* (deformação lenta devido a carga constante); solicitações mecânicas e mudanças físico-químicas. A fase inicial, chamada de deformação inicial, ocorre devido à sobrecarga, posteriormente, a fase seguinte é o recalque residual dos

materiais altamente deformáveis e o deslocamento de materiais inertes causando uma redução abrupta de volume. Por fim, mantendo-se a as cargas constantes, ocorrem deformações devido as transformações da matéria orgânica.

Na literatura, existem diversos modelos que podem prever os recalques em aterros sanitários. Nascimento (2007) cita diversas categorias dos modelos, como: modelo de consolidação (utiliza a teoria unidimensional de Terzaghi); modelos de processo reológico; modelo exponencial de creep; modelo de biodegradação e modelo de regressões. Em sua pesquisa, Nascimento (2007) utilizou o modelo convencional, aonde usa um consolidômetro (figura 2) de grandes dimensões para simular a tensão vertical sofrida pelos RSU.

Figura 2 - Consolidômetro



Fonte: Nascimento, 2007

3.2.4 Permeabilidade

Normalmente, essa propriedade pode ser determinada para resíduos por meio de testes como o ensaio triaxial. Nascimento (2007) obteve valores de permeabilidade de RSU a partir de ensaios triaxiais dos tipos CD e CU, na fase

de saturação, através da leitura do volume de água percolado no corpo de prova e do tempo de duração. Outra forma para se determinar a permeabilidade de resíduos sólidos urbanos pode ser in situ, por meio de poços escavados onde se avalia o tempo de redução da altura de água que preenche a escavação. O fluxo no resíduo urbano pode ser definido pela Lei de Darcy:

Equação 2 - Vazão de Percolação

$$q = A.k.i$$

onde, “q” é a vazão de percolação;

‘A’ é a área de percolação;

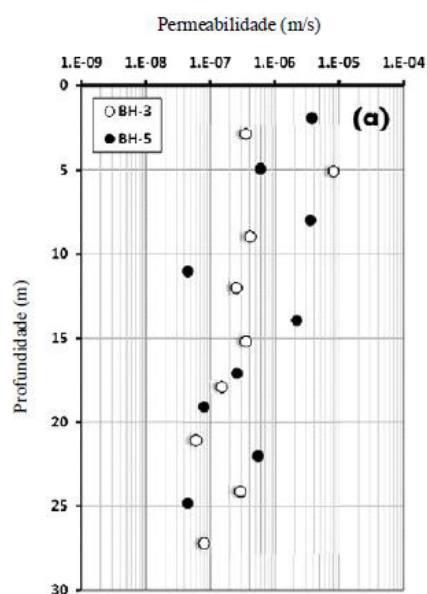
“k” é a constante de permeabilidade e

“i” é o gradiente hidráulico

Fonte: BOSCOV, 2008

Resultados de ensaios de infiltração (gráfico 6) realizados no Aterro Bandeirantes em São Paulo (MACHADO *et al.*, 2010) mostraram valores dispersos que podem ser justificados devido a heterogeneidade dos resíduos somado ao efeito de bloqueio dos plásticos, já que este material pode obstruir o fluxo de chorume nos RSU. Nota-se, também, pelo gráfico uma diminuição da permeabilidade dos resíduos conforme a profundidade aumenta.

Gráfico 6 - Ensaios de Infiltração no Aterro Bandeirantes



Fonte: Machado *et al.*, 2010

Por fim, a importância da permeabilidade é devida sua relação com a estabilidade do maciço, pois baixas permeabilidades causam a retenção de gás e chorume dando origem aos bolsões que desenvolvem pressões neutras (BOSCOV, 2008, pág.48). A maioria dos RSU, no Brasil, encaixam-se entre as faixas de permeabilidade de 10^{-6} a 10^{-4} m/s fato este que sugere que os RSU são materiais drenantes, não retendo os produtos gerados pela biodegradação de materiais putrescíveis.

4. Metodologia

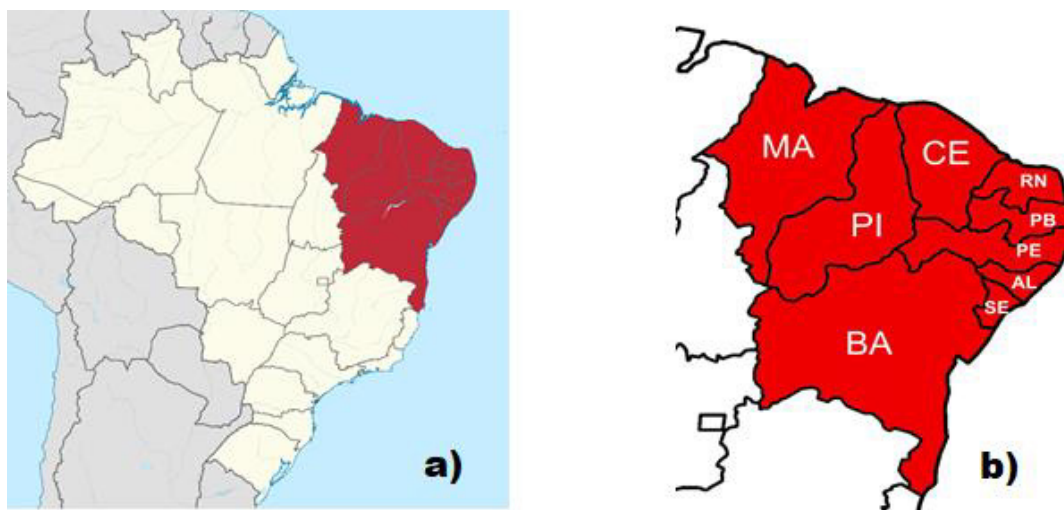
A metodologia adotada para realizar a pesquisa seguiu as seguintes etapas de acordo com os objetivos específicos já mencionados anteriormente:

- a) Definição dos locais dentro de uma região brasileira de estudo;
- b) Coleta de dados referenciados na bibliografia;
- c) Organização estrutural dos dados (planilhas, tabelas e gráficos);
- d) Análise e comparação de resultados obtidos.

4.1 Região e Locais de Estudo

A região definida para estudos foi o Nordeste do Brasil, onde foram coletados dados sobre aterros sanitários municipais presentes em alguns dos estados da região. A Figura 3 mostra a localização na região Nordeste do Brasil e os estados que a compõe.

Figura 3 - a) Região Nordeste do Brasil; b) Estados da Região Nordeste



Fonte: Cariridiário, 2019

A coleta de dados foi feita através de uma pesquisa bibliográfica a publicações disponíveis em programas de Pós-graduação de Estados do Nordeste, nas quais foram obtidos parâmetros geotécnicos de aterros de resíduos sólidos urbanos, dispostos em aterros sanitários. A partir da consulta

de várias bibliografias sobre o tema, foram selecionados dados dos seguintes aterros, por apresentarem maior quantidade de informações disponíveis:

- (a) Aterro Sanitário Oeste Caucaia (ASMOC) no estado do Ceará;
- (b) Aterro Sanitário Metropolitano Centro, na localizado no estado da Bahia;
- (c) Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa, localizado na Paraíba;
- (d) Aterro Sanitário de Muribeca, localizado em Pernambuco;
- (e) Aterro Sanitário de Altinho, também localizado em Pernambuco.

A seguir será feita uma breve descrição dos locais de estudo.

(i) *Aterro Sanitário Municipal Oeste Caucaia (ASMOC)*

O ASMOC se localiza no município de Caucaia, Zona Oeste da região Metropolitana de Fortaleza (RMF), distante cerca de 23 quilômetros do centro da capital cearense, e está situado próximo a BR 020, sendo limitado pelos paralelos 3°45' e 3°47' de latitude Sul e pelos meridianos 38°43' e 38°45' de longitude Oeste. O local foi selecionado por ser o maior local receptor de resíduos sólidos urbanos no Estado do Ceará.

A gestão do aterro é dividida entre três órgãos, sendo estes: ECOFOR, a Empresa Municipal de Limpeza e Urbanização (EMLURB) e a Autarquia de Regulação, Fiscalização e Controle dos Serviços Públicos de Saneamento Ambiental (ACFOR). A ECOFOR é responsável pelo recolhimento do lixo domiciliar e público enquanto a EMLURB coleta os resíduos dos serviços de raspagem varrição e capinação. Por fim, a ACFOR tem a função de administrar a prestação de serviços (OLIVEIRA, 2011).

Quantos aos resíduos, o ASMOC recebe-os de origem doméstica, pública e industrial (classe II) tendo uma taxa de deposição de aproximadamente 3600 toneladas/dia em uma área específica de 78 hectares de uma área total de 123 hectares (OLIVEIRA, 2011). Vale ressaltar que os resíduos que chegam não são previamente separados, sendo apenas pesados e levados para as células do aterro (LINARD, 2010). A Figura 4 mostra uma vista superior da área correspondente ao ASMOC.

Figura 4 - Vista Superior do ASMOC



Fonte: Nascimento, 2013

(ii) *Aterro Sanitário Metropolitano Central (AMC)*

O AMC é localizado na cidade de Salvador, capital do estado da Bahia no quilometro 6,5 da BA-526, na mesma região da Barragem de Ipitanga. A região é limitada pelos paralelos $12^{\circ} 51'$ e $12^{\circ} 51' 12''$ de latitude sul e pelos meridianos $38^{\circ} 23' 24''$ e $38^{\circ} 21'$ de longitude oeste.

O aterro opera desde 1999 pela empresa BATTRE e foi licenciado pelo Centro de Recursos Ambientais (CRA) a receber apenas resíduos domiciliares de classe IIA (não inertes). Vale ressaltar que o aterro em questão possui certificado por emissão reduzida (CERs) de carbono (LIMPURB, 2019)

Com relação ao recebimento de resíduos, o aterro recebe não somente de Salvador como, também, dos municípios de Simões Filho e Lauro de Freitas. A figura 5 mostra uma visão panorâmica do AMC recebendo cerca de 2500 toneladas/dia em uma área total de 250 hectares. (NASCIMENTO, 2007).

Figura 5 - Fotografia Aérea do Aterro Metropolitano Centro



Fonte: Nascimento, 2007

(iii) Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (ASMJP)

Inaugurado no ano de 2003, o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa foi construído em um terreno de 100 hectares, localizado no município de João Pessoa, capital da Paraíba, distante 25 quilômetros do centro da cidade, sendo seu acesso dado através da BR-101 no KM 23. O local foi escolhido pelos padrões condicionantes relacionados as restrições locais, ambientais e tecnológicas.

A administração do aterro sanitário é feita pela ASTRAMARE (Associação dos Trabalhadores de Materiais Recicláveis) que é responsável pelo gerenciamento dos resíduos descarregados, triagem e disposição nas 24 células dos quatro módulos iniciais.

Segundo a Abrelpe (2012) o estado da Paraíba gera cerca de 3.405 t/dia onde aproximadamente 81% é coletado. Desta geração, a capital paraibana é responsável por 30% do total de resíduos gerados. O aterro já recebeu um valor máximo mensal de cerca de 41.106,0 toneladas de resíduos originados da CODIAM (Consórcio de Desenvolvimento Intermunicipal da Área Metropolitana

de João Pessoa), região formada pelos municípios de João Pessoa, Cabedelo, Bayeux, Santa Rita, Conde, Cruz do Espírito Santo e Lucena (SILVESTRE, 2010).

(iv) *Aterro Sanitário de Muribeca*

O aterro é localizado em Pernambuco, na Região Metropolitana de Recife (RMR), no município de Jaboatão dos Guararapes, cerca de 15 quilômetros do Centro de Recife. O acesso ao aterro se dá pela PE-25 que se interliga com a BR-101. As coordenadas do local são: latitude 8° 9' 50" S e longitude 34° 59' 00" W.

Seu gerenciamento foi instituído através de um convenio firmado entre o Governo do Estado, a Prefeitura de Recife e a Prefeitura de Jaboatão dos Guararapes por meio da Gestão Compartilhada. Em 2001, o aterro passou por um processo de modernização atendendo a Legislação Ambiental e a Resolução do CONAMA nº20, no qual o Governo Estadual de Pernambuco implantou um sistema de triagem, drenagem e tratamento de gases.

O aterro foi construído em uma área total de 62 hectares com uma capacidade para receber 3.000 toneladas/dia de resíduos dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes. Na Figura 6 mostra-se uma célula de Muribeca após a cobertura de resíduos:

Figura 6 - Célula no Aterro Sanitário de Muribeca



Fonte: Maciel, 2009

(v) *Aterro Sanitário de Altinho*

Localizado no município de Altinho na Mesorregião do Agreste Pernambucano e Microrregião do Brejo Pernambucano, o aterro está distante cerca de 163 quilômetros do centro de Recife. O acesso ao município e, ao aterro, se dá pela BR-232 por meio da cidade de Caruaru ou pela PE-140 passando por Agrestina.

Com relação a gestão do Aterro Sanitário de Altinho, esta era inicialmente, realizada pelas Prefeituras dos Municípios de Altinho e Agrestina, cidades que eram atendidas pela coleta e destinação final no aterro. Com o crescimento da necessidade de outros municípios próximos, foi criado o COMAGSUL (Consórcio dos Municípios do Agreste e Mata Sul de Pernambuco), consorcio público com responsabilidades repartidas entre os 22 municípios que fazem parte.

O Aterro Sanitário de Altinho está em operação desde o ano de 2010 e recebe cerca de 40 a 45 toneladas/dia de resíduos sólidos na sua área de 10 hectares distribuídos em 4 quadrantes, cada um possuindo 4 células de 5 metros de altura (MATIAS, 2018). A baixa quantidade de resíduos sólidos urbanos recebida pelo aterro em questão pode ser justificada por o mesmo receber dos municípios de Altinho, Agrestina, Belém de Maria, Bonito e Lagoa dos Gatos que somam, apenas, 109.566 habitantes.

Figura 7 - Vista Via Satélite do Aterro de Altinho



Fonte: Google Earth, 2015

A figura 7 mostra uma visão fotográfica de um satélite que capturou a vista de cima do Aterro Sanitário de Altinho que foi, posteriormente, setorizada: “I” indica a estação de tratamento de efluentes; “II” mostra as células de deposição dos RSU e, por fim, “III” retrata o setor administrativo e a balança.

4.2 Coleta de Dados

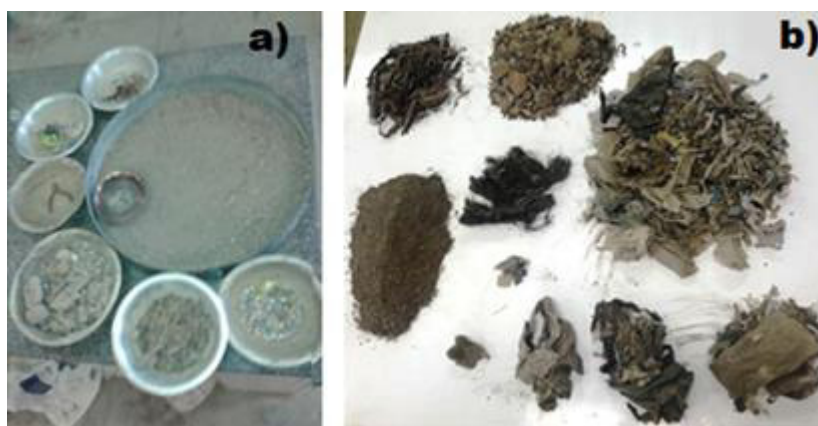
A coleta de dados se baseou por meio da seleção de teses e dissertações que compõe o repositório virtual de Universidades Federais da região Nordeste com a finalidade de levantar as propriedades índices (composição gravimétrica, peso específico e distribuição granulométrica) e as propriedades geotécnicas (resistência ao cisalhamento, compactação e permeabilidade) de aterros sanitários da região. A seguir serão apresentadas as propriedades índices e geotécnicas dos aterros citados que serão dados necessários para a construção inicial da metodologia.

4.2.1 Composição Gravimétrica

a) *Aterro Sanitário Metropolitano Oeste Caucaia (CE)*

Em sua pesquisa, Silva (2017) realizou o ensaio de caracterização física dos RSU do Aterro Sanitário Oeste Caucaia por meio de amostras coletadas em células encerradas com idade de mais de 15 anos (condição de Aterro Antigo). Tais amostras foram secas ao ar, sendo posteriormente quarteadas, até que se reduzisse ao peso de quarteamento, 8 kg. O ensaio baseou-se na separação manual de materiais acima da malha de 4,76 mm e na quantificação do peso de cada um dos constituintes do resíduo. Após a separação manual desses constituintes é que o resíduo foi passado na peneira de 4,76 mm, resultando em uma grande quantidade de madeira, vegetação e areia fina abaixo de 4,76 mm. A figura a seguir mostra os resultados da composição gravimétrica dos resíduos obtida por Silva (2017).

Figura 8 - Composição Gravimétrica dos RSU das células S-1(a) e S-2 (b)



Fonte: Silva, 2017

Os resultados obtidos por Silva (2017) com relação a composição gravimétrica dos resíduos das células antigas do ASMOC podem ser resumidos conforme a tabela a seguir:

Tabela 7 - Composição Gravimétrica ASMOC

Componentes	% Em massa da amostra
Putrescíveis	61,89
Outros	-
Plásticos	0,48
Trapos	0,07
Papel	0,017
Resíduo de Jardim	-
PET	-
Vidro	0,05
Borracha	-
Alumínio	-
Madeira	1,87
Pedregulho	34,72
Metal	0,75

Fonte: Silva, 2017

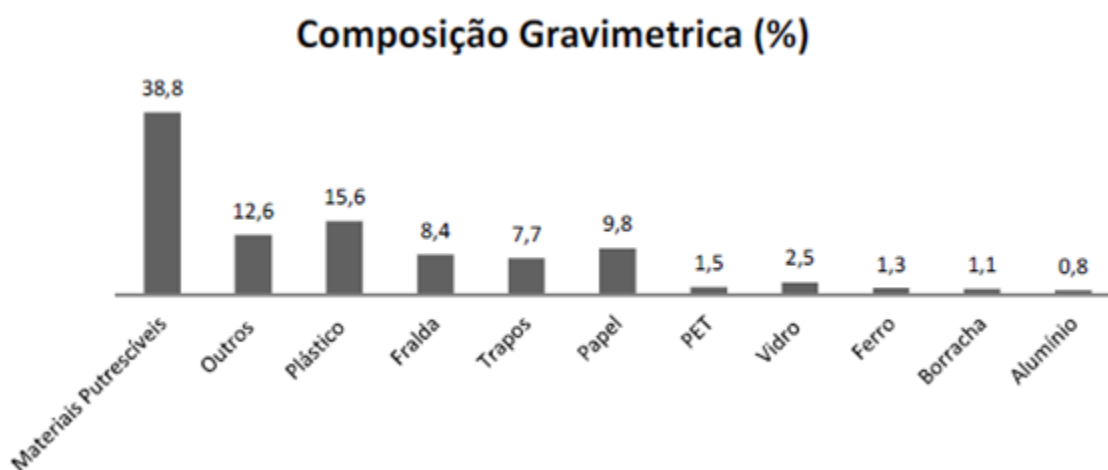
Observa-se um valor significativo de pedregulho devido ao material do solo ter-se misturado com os resíduos a medida em que ocorreram as deposições de RSU, já os valores de papel, vidro e plástico chama a atenção pois destoam significativamente de valores achados por outros autores. Além disso, não se encontrou pasta orgânica pois os resíduos já estavam secos.

Já Carneiro (2013) na determinação da composição gravimétrica do de uma célula experimental construída no ASMOC (condição resíduo novo), utilizou um tambor de plástico de 100 litros, uma balança de plataforma com capacidade máxima de 150 kg e uma lona de 15 m².

Vale ressaltar que as amostras de resíduos coletadas pela autora ocorreram diretamente do caminhão de coleta que transporta os RSU para o aterro sanitário. As mesmas foram despejadas sobre a lona onde ocorreu a separação dos mesmos para uma posterior pesagem.

Os resultados obtidos por Carneiro (2013) para a porcentagem de cada componente das amostras de RSU foram consolidadas no gráfico 7 a seguir:

Gráfico 7 - Composição Gravimétrica ASMOC



Fonte: Carneiro, 2013

Santos, G.O. et al. (2008) obteve, em sua estimativa da quantidade de RSU coletados em Fortaleza que eram destinados ao ASMOC, valores

próximos na composição gravimétrica, pois o percentual de matéria orgânica foi de 36,8%, plástico de 15,6%, papel 5,3%, metal 1,3% e vidro 2,3%.

Diferente do obtido por Silva (2017), Carneiro (2013) determina valores de borracha e alumínio, mas, também, de forma pouca expressiva, fato que pode caracterizar o aterro como pouco constituído desses dois materiais em questão.

b) Aterro Sanitário Metropolitano Centro (BA)

Nascimento (2007) em sua pesquisa sobre o comportamento dos resíduos sólidos urbanos do Aterro Sanitário Metropolitano Centro (ASMC) em Salvador, Bahia, determinou a composição gravimétrica do local por meio da separação manual e quantificação dos componentes presentes em peso seco. Interessante ressaltar que o autor em questão definiu como fração pastosa dos resíduos toda a parte remanescente da separação manual, composta por restos alimentares e podas de jardins.

Figura 9 - Separação Manual dos RSU



Fonte: Nascimento, 2007

A figura 9 mostra o momento de separação dos resíduos na estação de apoio do ASMC, onde foram separados aproximadamente 100 kg de cada resíduo que foram acondicionados em sacos plásticos e levados para secagem em estufa a 70°C para evitar a queima de matéria orgânica.

A tabela 8 mostra os resultados obtidos para a composição gravimétrica do ASMC em Salvador de resíduos novos, mas como para ensaios de caracterização ocorreram mais de uma campanha de coleta para amostra, sendo uma com resíduos novos datados do ano de 2006 mas não especificados, detalhadamente, do tempo de deposição pelo autor, e outra com RSU com 4 anos de aterramento. É interessante ressaltar que a fração percentual de papel e papelão diminuiu ao longo do tempo, devido a evolução do processo de degradação que faz com que o papel e papelão sejam incorporados na fração pastosa aumentando assim sua porcentagem com relação a massa total do resíduo.

Tabela 8 - Composição Gravimétrica ASMC

	RSU novo	
	Mar/2006	Out/2006
Madeira	4,22	3,85
Pedra / cerâmica	9,64	12,55
Têxteis	0,95	9,46
Borracha	0,03	0,11
Plástico	16,47	17,08
Vidro	5,23	1,21
Metal	1,36	0,83
Papel / papelão	15,60	10,68
Fração pastosa	42,31	44,23
Sólidos totais voláteis STV (%)	56,81	54,86
Matéria orgânica presente na fração pastosa (%)	24,04	24,28

Fonte: Nascimento, 2007

O aumento na fração pastosa não se deu somente pela degradação, com o tempo, de materiais como papel e papelão, mas também, pela incorporação do solo de cobertura do aterro durante a fase de operação. Já a elevação da quantidade de pedra e cerâmica se deu por serem materiais que não são biodegradáveis, então se acumularam com o tempo já que houveram demais deposições.

c) Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (PB)

Azevedo (2012) elaborou uma metodologia de três etapas para definir a composição gravimétrica do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (ASMJP), sendo elas: avaliação do sistema de coleta dos resíduos nos bairros; seleção de amostras de resíduos residenciais na capital paraibana e amostragem em campo para composição do aterro em questão.

Azevedo (2012) utilizou a metodologia francesa MODECOM para caracterizar os resíduos. Tal metodologia classifica os resíduos em uma das treze categorias que podem ser atestadas na tabela 9:

Tabela 9 - Metodologia MODECOM

CATEGORIAS	EXEMPLO DE RESÍDUOS
FRAÇÃO ORGÂNICA	RESTOS DE ALIMENTOS E CASCAS.
PAPEL	JORNAL, REVISTAS, PAPEIS EM GERAL.
PAPELÃO	CAIXAS, EMBALAGENS, ENTRE OUTROS.
RESÍDUO VERDE	PODA (GALHOS E FOLHAS) e COCO.
PLÁSTICO	SACOLA, PET, DESCARTÁVEIS E EMBALAGENS.
METAL	LATINHAS, TAMPINHAS E CONSERVAS.
VIDRO	VIDRARIA EM GERAL
TECIDO	ROUPAS, RETALHOS, LENÇÓIS, ENTRE OUTROS.
HIGIENE PESSOAL	PAPEL HIGIÊNICO, ABSORVENTE E FRALDA.
INFLAMÁVEIS	COURO, MADEIR, BORRACHA, ENTRE OUTROS.
INERTE	PEDRA, OSSO, CERÂMICA, PORCELANA, ENTRE OUTROS.
RESÍDUO ESPECIAL	HOSPITALAR, PILHAS, AEROSSOL, TINTAS E ETC.
FINOS	RESÍDUO INFERIOR À 20 mm

Fonte: Azevedo, 2012

Com relação a preparação da amostragem da pesquisa, a mesma seguiu o padrão de quarteamento e as precauções de amostragem da NBR 10.007/2004. A quantidade de resíduos coletados pelo caminhão que era direcionada ao Aterro Sanitário Municipal de João Pessoa era cerca de 10.000 kg, sendo distribuído igualmente em quatro parcelas de aproximadamente de mesmas dimensões. Realizava-se então o primeiro quarteamento desprezando duas quartas diametralmente opostas. As outras duas quartas restantes foram misturadas e revolvidas, totalizando 5.000 kg de resíduos. Em seguida, realizava-se o segundo quarteamento com o mesmo descarte de duas quartas, totalizando o restante de resíduo de 2.500 kg. O processo teve fim quando se obteve duas amostras totalizando 1.000 kg de resíduos que foram direcionados para a separação manual. Posteriormente, determinou-se o percentual em peso de cada componente.

Figura 10 - Caracterização dos Resíduos no ASMJP



Fonte: Azevedo, 2012

Azevedo (2012) obteve os seguintes resultados da composição gravimétrica dos resíduos do aterro sanitário Metropolitano de João Pessoa:

Tabela 10 - Composição Gravimétrica ASMJP – Resíduo novo

CATEGORIAS MODECOM	COMPOSIÇÃO (%)
FRAÇÃO ORGÂNICA	34,90
RESÍDUO VERDE	15,46
PLÁSTICO	14,36
HIGIENE PESSOAL	10,08
PAPELÃO	4,63
FINOS	4,28
PAPEL	4,07
TECIDO	3,53
INFLAMÁVEIS	3,20
INERTE	1,87
METAL	1,31
VIDRO	1,30
ESPECIAIS	1,01

Fonte: Azevedo, 2012

O autor em questão ressalta que a composição do resíduo sólido do aterro sanitário apresenta uma discrepância em relação à composição observada no Brasil, devido aos resíduos depositados no aterro de João Pessoa possuírem diferentes origens, tais como da orla marítima, de cemitérios, de feiras e de matadouros. Tal fato pode justificar o porquê de não haver um padrão na geração de resíduos com apenas características residenciais e domiciliares.

d) Aterro Sanitário de Muribeca (PE)

Noberto (2019) coletou amostras de resíduos envelhecidos de células do Aterro sanitário de Muribeca que possuíam 10 anos de vida. Para realização desse processo, houve necessidade de se usar uma retroescavadeira para que se fosse possível atingir profundidades mais elevadas.

Para a determinação da gravimetria dos resíduos do aterro em questão foi realizado por meio da técnica de quarteamento conforme a metodologia sugerida pela NBR 10.007 (ABNT, 2004). Tal metodologia define

que deve haver dois quarteamentos iniciais para posteriormente haver uma separação da amostra resultante em duas partes, sendo uma selecionada para a análise gravimétrica.

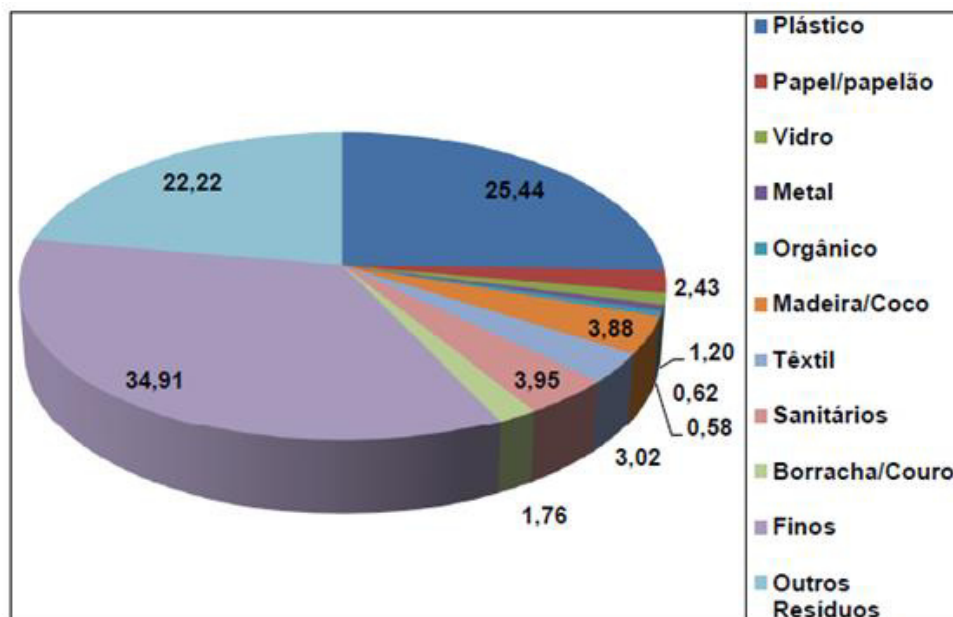
Figura 11 - Quarteamento final (a) e separação em duas partes para seleção de análise (b)



Fonte: Noberto, 2019

O resultado obtido pela análise gravimétrica realizada por Noberto (2019) pode ser expressa pelo gráfico 8 que mostra as porcentagens de classificação de resíduo:

Gráfico 8 - Composição Gravimétrica de Muribeca



Fonte: Noberto, 2019

Observa-se que a composição gravimétrica da célula experimental é cerca de 34,91%, seguido por plástico com 25,44%, outros resíduos com 22,22%, sanitários com 3,95%, madeira/coco com 3,88%, têxtil com 3,02%, papel/papelão com 2,43%, borracha/couro com 1,76%, vidro com 1,20%, metal com 0,62% e por último material orgânico com 0,58%.

Com relação ao baixo percentual de matéria orgânica (menos de 1%), esse dado leva a compreensão de que o aterro está encerrando o processo de biodegradação já que as amostras foram coletadas após 10 anos de atividade do aterro. Além disso, realizando um comparativo entre as composições gravimétricas pré-aterro de Maciel (2009) e Noberto (2019) percebemos como essa redução é abrupta na tabela 11:

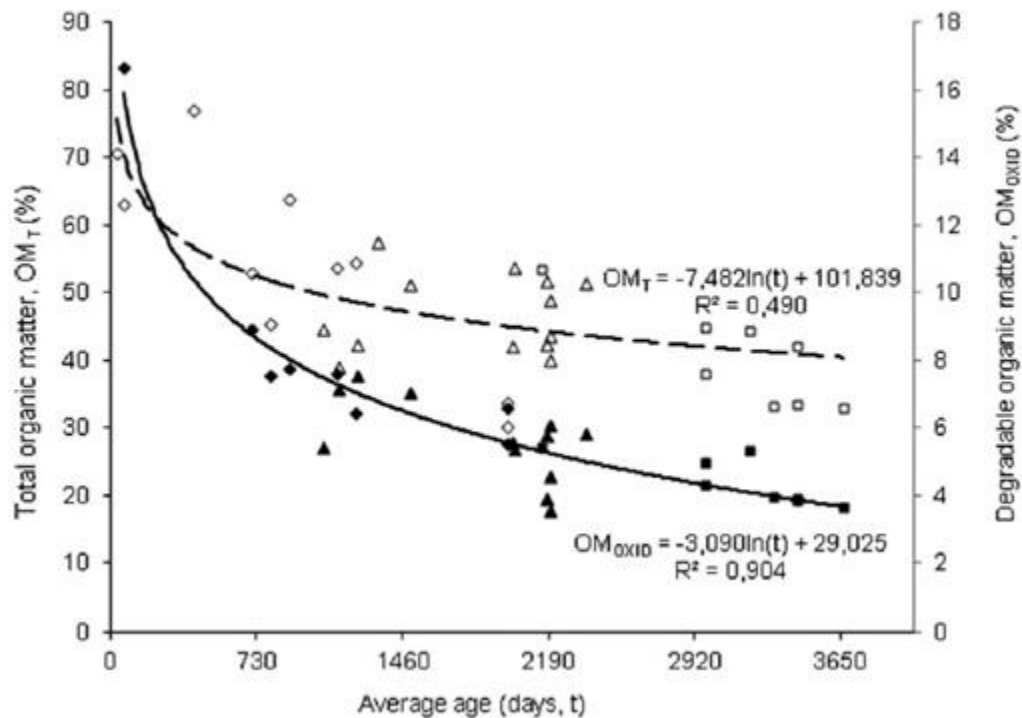
Tabela 11 - Comparativo da Composição Gravimétrica com diferença de 10 anos

Tipologia	Composição Gravimétrica (%)	
	Gravimetria Pré-Aterro Maciel (2009)	Gravimetria após 10 anos Noberto (2019)
Plástico	21,50	25,44
Papel/papelão	14,20	2,43
Vidro	0,70	1,20
Metal	1,80	0,62
Matéria orgânica	42,00	0,58
Madeira/Coco	6,00	3,88
Têxtil	4,20	3,02
Sanitários	4,30	3,95
Borracha/Couro	1,20	1,76
Finos	-	34,91
Outros Resíduos	4,10	22,22

Fonte: Noberto, 2019

O valor significativo da redução de matéria orgânica foi comprovado também por Gomes et al. (2013) que realizou testes laboratoriais do Aterro Sanitário de Santo Tirso, norte de Portugal que teve seu percentual gravimétrico de matéria orgânica de 80%, inicialmente, e, após dois anos, houve redução para um valor de 47% chegando a 19% em 10 anos conforme mostra o gráfico 9 a seguir:

Gráfico 9 - Redução de Matéria Orgânica no Aterro Sanitário Santo Tirso



Fonte: Gomes et al., 2013

e) Aterro Sanitário de Altinho (PE)

Melo (2015), em seu estudo sobre o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos nos municípios de Pernambuco, determinou a composição gravimétrica dos resíduos sólidos onde hoje é o Aterro Sanitário de Altinho, localizado no Sítio Juá que a princípio funcionava como um lixão.

Melo (2015), utilizou a legislação portuguesa Portaria nº851/2009, mesma utilizada pela Comunidade Econômica Europeia (CEE), para auxílio do seu processo de determinação da composição gravimétrica já que a legislação em questão permite definir categorias e subcategorias para a classificação dos resíduos, como mostra a tabela 12.

Tabela 12 - Categorias e Subcategorias de RSU

CATEGORIAS	SUBCATEGORIAS
Papel/cartão	Resíduos de embalagens de papel/cartão Jornais e revistas Outros resíduos de papel/cartão
Plástico	Resíduos de embalagens em filme de PE Resíduos de embalagens rígidas em PET Resíduos de embalagens rígidas em PEAD Resíduos de embalagens rígidas em EPS Outros resíduos de embalagens de plástico Outros resíduos de plástico
Vidro	Resíduos de embalagens de vidro Outros resíduos de vidro
Compósitos	Resíduos de embalagens de cartão para alimentos líquidos (ECAL) Outros resíduos de embalagens compósitas Pequenos aparelhos eletrodomésticos Outros resíduos compósitos
Têxteis	Resíduos de embalagens têxteis Outros resíduos têxteis
Têxteis sanitários	Resíduos têxteis sanitários
Metais	Resíduos de embalagens ferrosas Resíduos de embalagens não ferrosas Outros resíduos ferrosos Outros resíduos metálicos
Madeira	Resíduos de embalagens de madeira Outros resíduos de madeira
Resíduos perigosos	Produtos químicos Tubos fluorescentes e lâmpadas de baixo consumo Pilhas e acumuladores Outros resíduos perigosos
Outros resíduos	Outros resíduos de embalagens Outros resíduos não embalagens

Fonte: Melo, 2015

A composição gravimétrica foi realizada em campo, sendo para este estudo os resíduos foram categorizados em 18 tipos de materiais, a saber: (1) resíduos alimentares (orgânicos); (2) resíduos de jardim; (3) papel/papelão; (4) plástico filme; (5) PET; (6) PEAD; (7) PVC; (8) PP; (9) PEBD; (10) outros plásticos; (11) compósitos; (12) têxtil; (13) sanitários; (14) metal; (15) vidro; (16) madeira/coco; (17) resíduos perigosos; (18) outros resíduos.

Foram coletados 1138 kg de resíduos, entre o período de novembro de 2014 a fevereiro de 2015, diretamente do veículo de coleta, momentos antes do despejo nas células do aterro, com o intuito da separação e pesagem dos mesmos com o auxílio do Grupo de Resíduos Sólidos (GRS) da Universidade

Federal de Pernambuco (UFPE) consolidando, segundo a metodologia portuguesa, a tabela a seguir:

Tabela 13 - Composição Gravimétrica dos Municípios do COMAGSUL

Classes de resíduos	Bonito	Agrestina	Belém de Maria	Altinho	Lagoa dos Gatos
Madeira/coco	6,6%	7,9%	5,7%	0,6%	8,7%
Compósitos	1,8%	0,7%	3,5%	2,1%	2,0%
Resíduos de Jardim	1,1%	2,7%	2,5%	2,3%	2,4%
Metais	1,5%	0,7%	0,2%	2,2%	1,2%
Bio-resíduos (orgânicos)	28,8%	30,2%	31,7%	24,5%	42,7%
Outros	14,9%	17,5%	11,2%	5,8%	5,0%
Papel/cartão	7,7%	7,5%	7,8%	5,3%	4,1%
Resíduos perigosos	1,0%	0,6%	0,4%	0,4%	0,9%
Plástico	18,9%	14,1%	21,1%	24,3%	15,0%
Têxteis/Sanitários	10,1%	9,1%	11,4%	22,2%	13,4%
Têxteis	6,6%	7,6%	4,2%	8,0%	4,0%
Vidro	1,0%	1,5%	0,4%	2,3%	0,7%

Fonte: Melo, 2015

4.2.2 Peso Específico

a) Aterro Sanitário Metropolitano Oeste Caucaia (CE)

Carneiro (2013) em seu estudo a respeito do Aterro Sanitário Municipal Oeste Caucaia sobre a capacidade de carga dos resíduos sólidos urbanos, em células experimentais localizadas no próprio aterro em questão, obteve o peso específico dos resíduos sólidos por meio de ensaios *in situ*, a partir da retirada de material de uma vala, com pesagem do mesmo material e determinação do volume da vala.

Durante a pesquisa em questão, foi feito um furo a trado no interior da célula até o momento em que se encontrasse resíduo, posteriormente, realizou-se a escavação com dimensões de 37 cm x 20 cm com uma profundidade de 25 cm, uma profundidade reduzida, segundo Marques (2001) que recomenda profundidades de 2 a 4 metros, porém a autora em questão ressalta a dificuldade na retirada de amostras indeformadas, fato que pode justificar a vala com pouca profundidade. Por fim, a vala foi revestida internamente com um plástico que recebeu água, de um recipiente com volume conhecido, até o momento em que o furo ficou completamente preenchido, como se observa na figura 12, o processo que foi realizado com o intuito de determinar o volume da vala em que se encontravam os resíduos.

Figura 12 - Processo de Obtenção do Peso Específico a) Equipamento Utilizado no ensaio b) Escavação da Vala c) Ensaio para obtenção do peso específico



Fonte: Carneiro, 2013

O resultado obtido para a determinação do peso específico natural foi de 17 kN/m^3 , o valor elevado pode ser justificado pelas pequenas dimensões da vala utilizada para o teste “*in situ*”. Outro fator que justificaria o elevado peso específico é ter ocorrido mistura do solo de aterro com as amostras. O valor do peso específico dos RSU, no ano dos despejos destes, foi de 7 kN/m^3 , fato que é confirmado por Santos e Presa (1995) que determinaram a faixa de 7 kN/m^3 para condições de RSU novos.

O valor de 17 kN/m^3 é previsto, por Koning e Jessberger (1997) para resíduos em condições de elevado grau de compactação, fato que mostra como

esse índice físico possui uma ampla faixa de variação. Matasovic e Kavazanjan (1998) também encontraram valores acima de 18 kN/m^3 para o peso específico dos RSU de um aterro sanitário ao sul da região d Califórnia nos Estados Unidos.

Dois anos antes, Carneiro (2013) havia realizado ensaios para a determinação do peso específico dos RSU nas condições iniciais da célula experimental, com dimensões de $14 \text{ m} \times 14 \text{ m}$ e 4 metros de profundidade, obtendo o valor de 7 kN/m^3 , fato que reforça a hipótese de a profundidade da coleta de amostra e as dimensões da escavação podem influenciar no valor do peso específico, além da condicionante do tempo de deposição.

b) Aterro Sanitário Metropolitano Centro (BA)

Nascimento (2007) determinou o peso específico dos resíduos sólidos do Aterro Sanitário Metropolitano Centro, Salvador/BA, com base na NBR 6508 (ABNT, 1984) e as correspondentes técnicas de mecânica dos solos. O material utilizado como amostra foi secado em estufa a uma temperatura de 70°C , posteriormente, o material foi picado com o auxílio de um pequeno triturador afim de que o mesmo coubesse em um picnômetro. O resíduo foi colocado manualmente no consolidômetro e comprimido até que se atingisse o peso específico natural de 7 kN/m^3 para, posteriormente, realizar testes para a determinação do peso específico das partículas sólidas.

Os testes realizados foram para resíduos novos e antigos (4 anos aterrados), além disso o autor em questão, realizou o mesmo teste três vezes para cada tipo de resíduo apresentado na tabela a seguir, onde é possível comprovar os valores encontrados para o peso específico das partículas sólidas de cada resíduo.

Tabela 14 - Peso específico das partículas sólidas dos RSU do ASMC

Resíduo	γ_s (kN/m ³)
Novo - Mar/2006	17,3
Novo - Out/2006	17,2
Novo - Matriz Básica	17,6
4 anos de aterrado	20,3

Fonte: Nascimento, 2007

c) Aterro Sanitário de Muribeca (PE)

Noberto (2019) realizou a coleta de amostras, no Aterro Sanitário Municipal de Muribeca/PE, em uma célula com resíduo envelhecido com 10 anos de idade utilizando uma retroescavadeira (Figura 13) para atingir as profundidades mais elevadas do local. A profundidade dos resíduos retirados foi cerca de dois metros de uma altura total de nove metros da célula.

Figura 13: Retroescavadeira usada para retirada do Resíduo



Fonte: Noberto, 2019

Após a realização de ensaios o autor chegou ao valor de 23,87 kN/m³ para o valor de peso específico dos grãos os resíduos da célula em questão. O

peso específico aparente seco com relação as umidades, obtido pelo referido autor é apresentado a tabela 15:

Tabela 15 - Pesos específico aparente seco e umidade ótima

	Tipo	γ_s(kN/m³)	w (%)
Matriz Básica	100% matriz fina	12,40	30,30
Matriz Composta 1	83,83% matriz fina + 16,17% Fibras	9,70	33,80
Matriz Composta 2	67,67% matriz fina + 32,33% Fibras	8,00	37,01

Fonte: Modificado de Noberto, 2019

A tabela 15 mostra três faixas para a determinação do peso específico máximo seco com relação a porcentagem de matriz fina e de fibras (plásticos e tecidos) na amostra que foram adicionadas, em partes, no percentual das amostras como é o caso das Matrizes Compostas, diferente da Matriz Básica que é 100% da matriz fina. Para um maior teor de fibras há um menor peso específico, tal fato se dá, pois, as fibras reduzem o volume de vazios e contribuem para uma absorção de água maior, reduzindo o peso específico e aumentando a umidade ótima.

Por correlação de fórmulas, sabe-se que o peso específico natural pode ser encontrado pelo produto do peso específico seco com a soma da umidade mais 1, logo o peso específico natural para Matriz Básica seria de 16,16 kN/m³ (12,4 x 1,3030), para Matriz composta 1 seria de 12,97 kN/m³ e, por fim, da Matriz Composta 2 seria de 10,96 kN/m.

O valor para o peso específico natural para a matriz fina (original, sem adição de fibrosos) pode ser justificado pelo tempo de decomposição da região em que as amostras foram retiradas (10 anos), já que deve-se considerar uma eliminação de biogás e chorume que elevam o valor do peso específico natural.

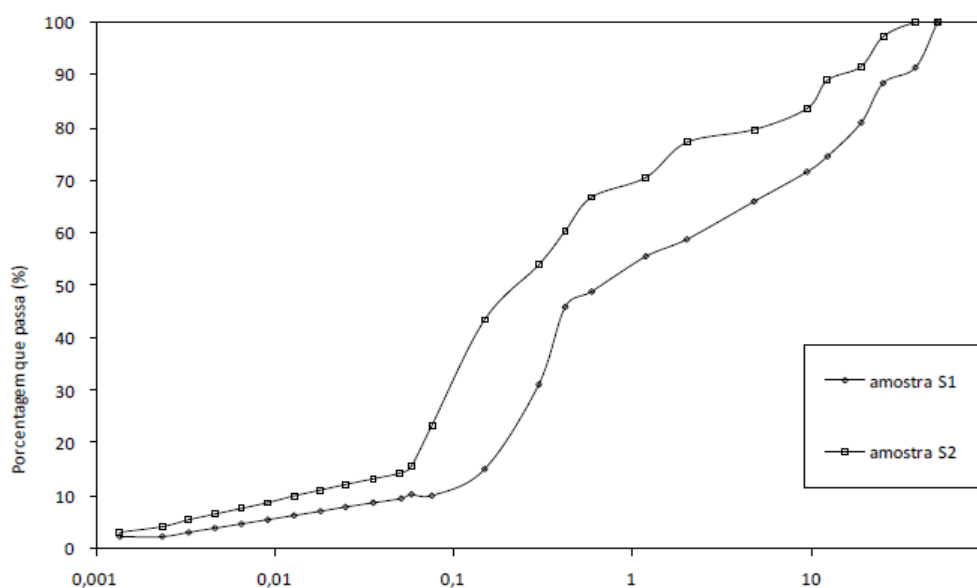
4.2.3 Distribuição Granulométrica

a) Aterro Sanitário Metropolitano Oeste Caucaia (CE)

Silva (2017) determinou a distribuição granulométrica dos resíduos do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste Caucaia (ASMOC) por meio de peneiras pré-selecionadas nos tamanhos 2", 1 ½", 1", ¾", ½", ⅜", 4,76mm, 2,00mm, 1,2mm, 0,6mm, 0,3mm, 0,15mm e 0,074mm. Com isso, foi possível definir a porcentagem de partículas que passaram em cada peneira e, dessa forma, traçar a curva dos diâmetros dos componentes (RSU do aterro sanitário).

Para representação da distribuição granulométrica dos RSU houve separação dos resíduos de forma visual para aqueles materiais que estivessem acima de 4,8 mm. O gráfico 10 mostra as curvas obtidas para cada amostra:

Gráfico 10 - Curva Granulométrica dos RSU



Fonte: Silva, 2017

As amostras para o ensaio de granulometria foram retiradas do solo de cobertura da célula experimental e mostram valores de 41% e 29% de pedregulho, 49% e 55% de areia, 6% e 9% de silte e 4% e 7% de argila para as amostras 1 e 2 respectivamente.

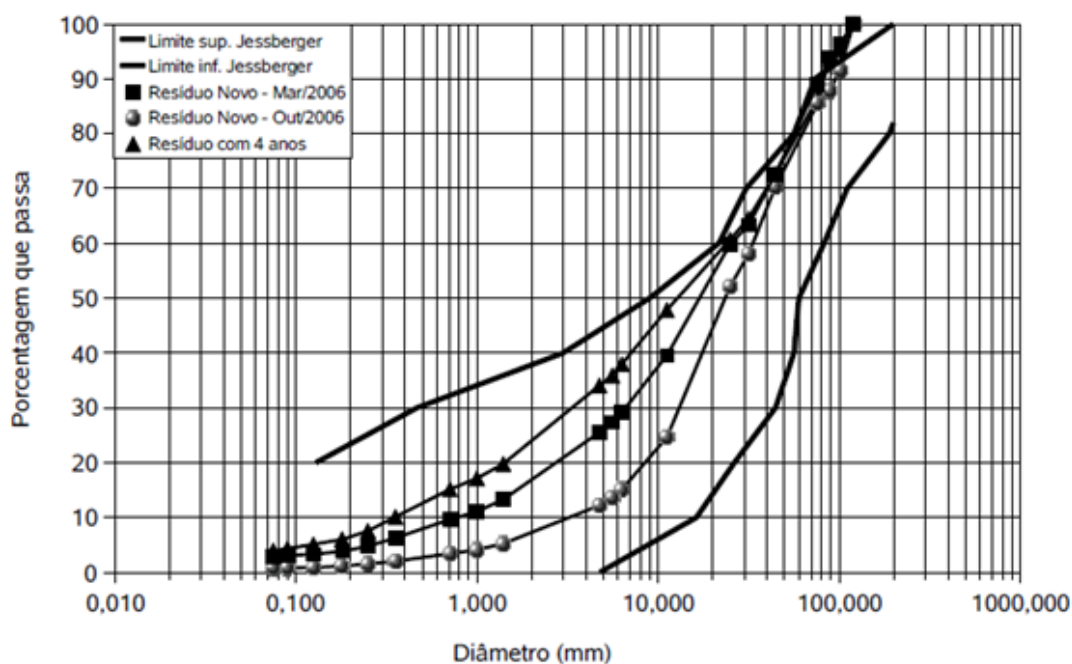
b) Aterro Sanitário Metropolitano Centro (BA)

Nascimento (2007) também determinou a distribuição granulométrica por meio de peneiras pré-selecionadas, em sua pesquisa, as amostras foram coletadas no Aterro Sanitário Metropolitano Centro, na Bahia. Dessa forma, foi

possível determinar as porcentagens que passavam em cada peneira de tal meio que se obtivesse os diâmetros dos componentes. O autor ressalta que os materiais fibrosos, como têxteis e plásticos moles, não foram incluídos nos ensaios.

As peneiras pré-definidas utilizadas possuíam aberturas de malha nos tamanhos de 101 mm; 88,9 mm; 76,2 mm; 44,4 mm; 31,7 mm; 25 mm; 11,2 mm; 6,3 mm; 4,75 mm; 2 mm; 1,4 mm; 1 mm; 0,71 mm; 0,355 mm; 0,255 mm; 0,18 mm; 0,125 mm; 0,09 mm e 0,075 mm. O material seco foi passado nas peneiras para se obter as curvas mostradas no Gráfico 11:

Gráfico 11 - Curva granulométrica de RSU novos e antigos



Fonte: Nascimento, 2007

Pode-se notar que as curvas granulométricas que representam os RSU novos possuem diferenças entre si, que pode ser justificada pela heterogeneidade das amostras coletadas no aterro sanitário. Observou-se uma menor quantidade de finos, em relação ao resíduo com 4 anos de deposição. Este aumento no número de finos com o tempo do resíduo está associado a degradação do material.

c) Aterro Sanitário de Muribeca (PE)

Noberto (2019) em seu trabalho a respeito da avaliação de ensaios de cisalhamento direto no Aterro Sanitário de Muribeca, Pernambuco, coletou amostras de uma célula no local com 10 anos de uso, ou seja, o resíduo utilizado é considerado envelhecido.

Com relação ao material granular utilizado nas amostras, o autor utilizou procedimentos normativos técnicos que compõem a NBR 6457 (ABNT, 2016) que dispõe a respeito da preparação de amostras para análise granulométrica. Com relação a análise granulométrica propriamente dita, utilizou-se da NBR 7181 (ABNT, 2018) que dispõe sobre métodos de análise da granulometria por meio do peneiramento ou da combinação sedimentação e peneiramento.

O material coletado foi seco e posteriormente passou por um processo de triagem para a separação do material fino, utilizado nos ensaios, do material fibroso que foi recortado para depois ser usado em outros ensaios.

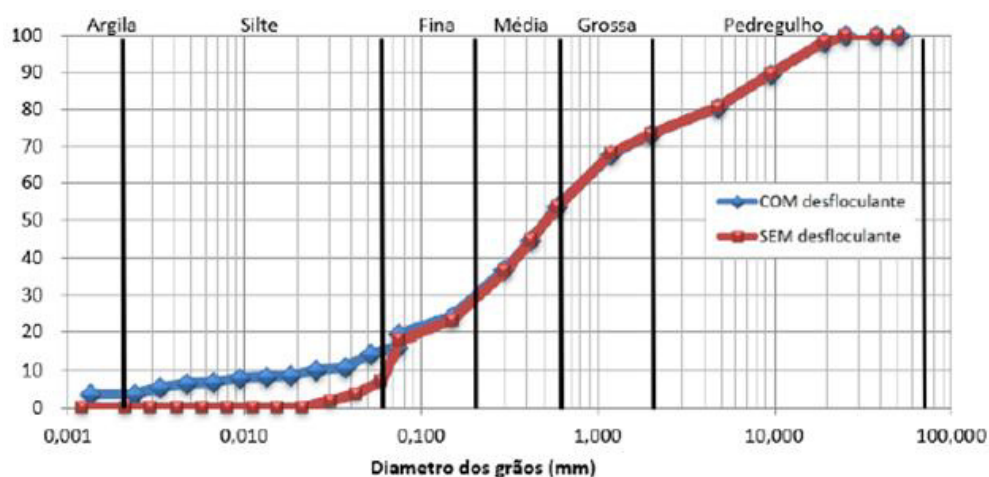
Figura 14 - Preparação das Amostras



Fonte: Noberto, 2019

O gráfico 12 a seguir, mostra o resultado para as curvas granulométricas obtidas utilizando ou não defloculante. Além disso, a tabela 16 faz um consolidado dos percentuais granulométricos obtidos para a matriz fina analisada.

Gráfico 12 – Curva Granulométrica com e sem defloculante



Fonte: Noberto, 2019

Tabela 16 - Resumo dos Resultados de Caracterização Física

Y (kN/m ³)	Defloculante	Composição Granulométrica (%)					
		Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
23,87	Sem	26,75%	19,62%	23,64%	22,67%	7,33%	0,00%
	Com	26,75%	19,62%	23,64%	13,65%	12,35%	4,00%

Fonte: Noberto, 2019

4.2.4 Resistencia ao Cisalhamento

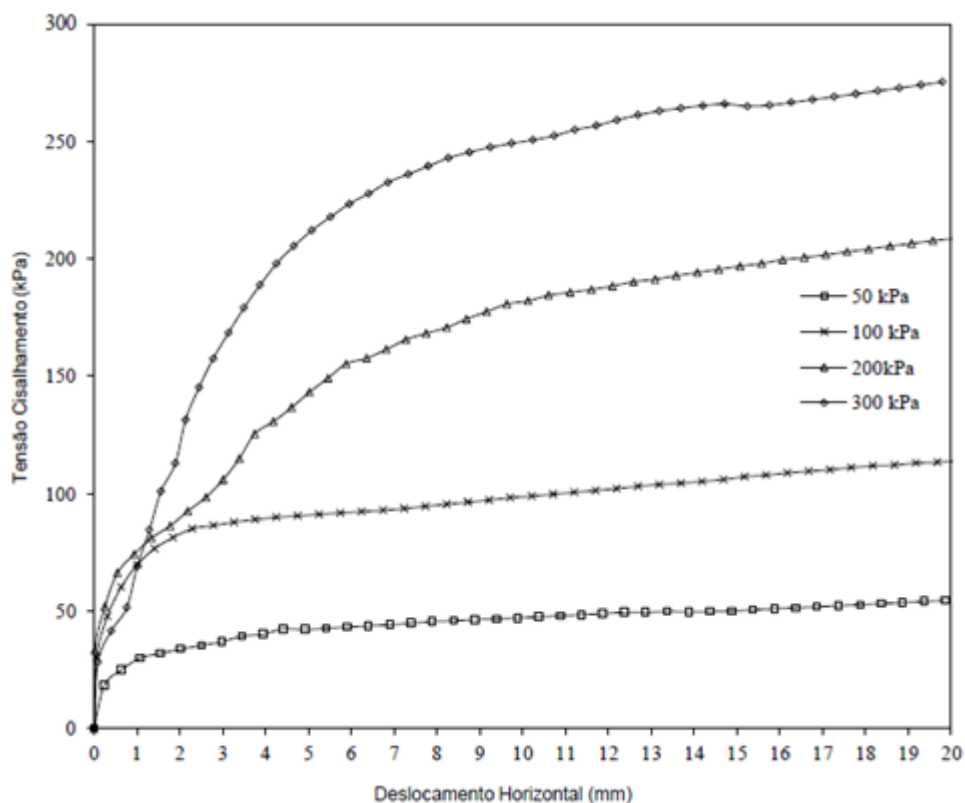
a) Aterro Sanitário Municipal Oeste Caucaia

Silva (2017), inicialmente, passou as amostras de RSU do aterro antigo (15 anos de deposição) na peneira 6,3 mm que foram moldadas na umidade ótima e no peso específico máximo, em caixas bipartidas para ensaio

de cisalhamento direto. As dimensões definidas para os corpos de prova foram de 70 mm de altura com dimensões na base de 100 mm por 100 mm.

Durante o ensaio, foram aplicadas tensões normais de 50, 100, 200 e 300 kPa para deslocamentos horizontais de 5, 10, 15 e 20% respectivamente. O gráfico 13 a seguir mostra as curvas de tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal.

Gráfico 13 - Curvas de tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal



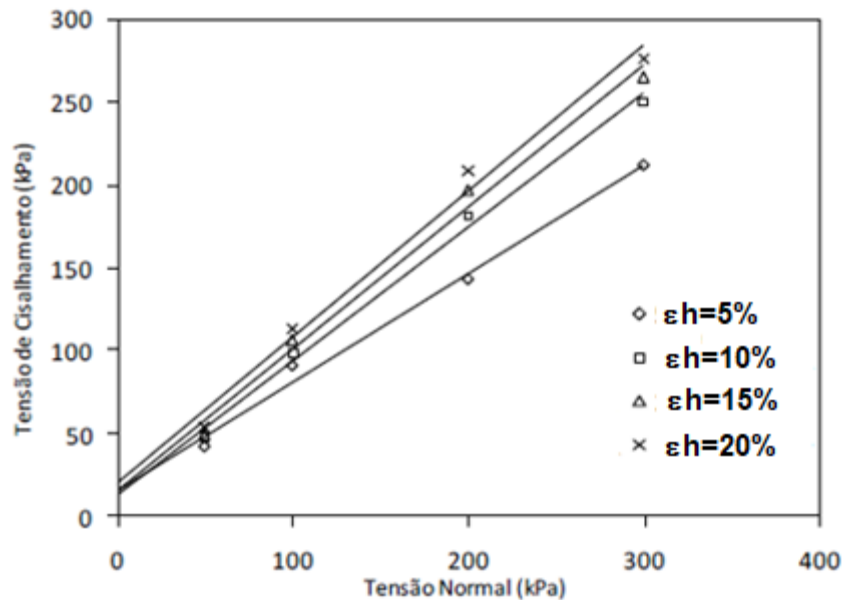
Fonte: Silva, 2017

Verifica-se um aumento da tensão de ruptura com o aumento da tensão normal. Vale ressaltar que os corpos de prova estavam todos nas mesmas condições já que os valores de pesos específicos aparentes secos e as umidades eram todos iguais entre os corpos de prova.

O gráfico 14 a seguir mostra a relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal para os deslocamentos horizontais de 5, 10, 15 e 20% que

permitiram definir os valores de coesão, em kPa, e de ângulo de atrito mostrados na tabela 17.

Gráfico 14 - Envoltórias de Resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal



Fonte: Modificado de Silva, 2017

Tabela 17 - Coesão e Ângulo de Atrito de acordo com o Deslocamento Horizontal

PORCENTAGEM	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (ϕ)
5%	15,9	33,1
10%	13,3	38,8
15%	16,0	40,5
20%	20,5	40,6

Fonte: Silva, 2017

O ângulo de atrito foi elevado ficando numa ordem de grandeza de solos granulares. Já a coesão foi baixa, o que também é compatível com o

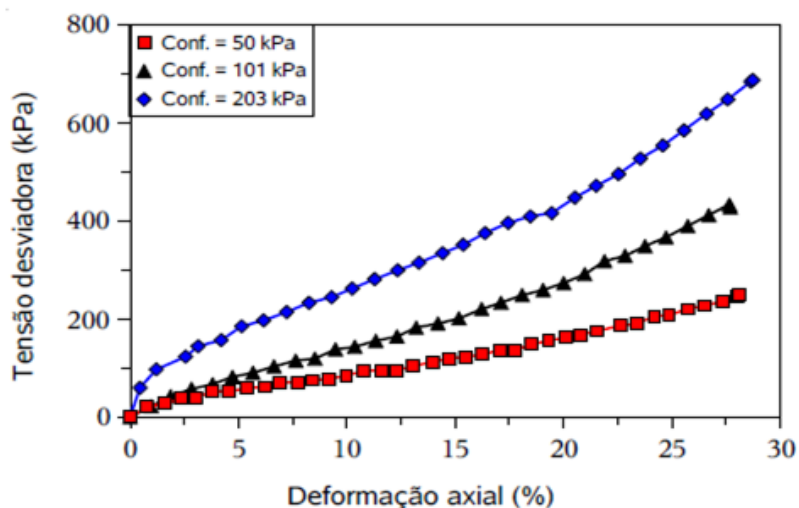
intercepto coesivo de solos granulares. Tais características são confirmadas com os resultados dos ensaios, destas mesmas amostras (“Aterro Antigo”), de granulometria que mostraram 35% de pedregulho e 51% de areia.

b) Aterro Sanitário Metropolitano Centro (BA)

Nascimento (2007) realizou coleta de amostras de resíduos sólidos urbanos novos (recentemente aterrados) e velhos (aterrados a 4 anos). Tais amostras foram coletadas segundo as recomendações da NBR 10007 (ABNT, 2004). Os resíduos novos foram provenientes de caminhões compactadores com o auxílio de uma retroescavadeira que coletou os RSU no momento da descarga no Aterro Sanitário Metropolitano Centro. Com relação as dimensões dos corpos de prova, foram dimensionados em 200 mm de diâmetro e 400 mm de altura.

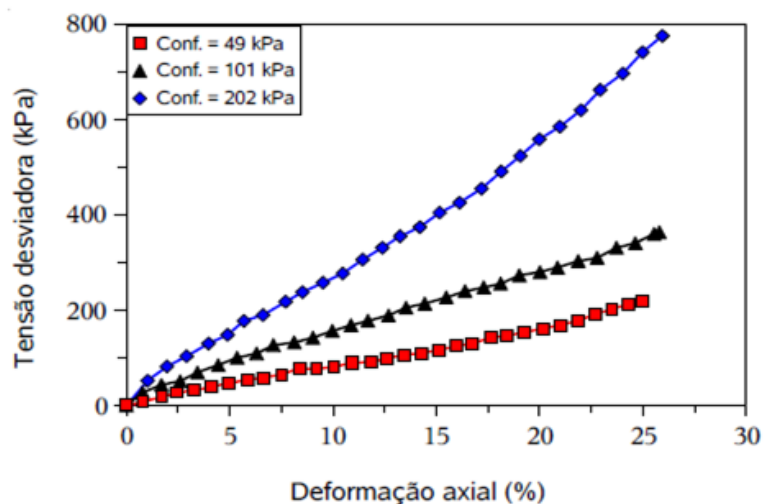
O autor em questão realizou de ensaios triaxiais convencionais do tipo consolidado drenado (CD). Os corpos de prova foram confinados em pressões efetivas de 50, 100 e 200 kpa em seguidas foram submetidos a ruptura com velocidade de cisalhamento de 8,0 mm/minuto. Conforme o gráfico 15 a seguir, as curvas de tensão-deformação apresentaram um comportamento típico de RSU, já que não atingem um valor máximo.

Gráfico 15 - Curvas de Tensão-Deformação para amostras de RSU Novos



Fonte: Nascimento, 2007

Gráfico 16 - Curvas de Tensão-Deformação para as amostras de RSU antigos



Fonte: Nascimento, 2007

Nascimento (2007) obteve as envoltórias a partir dos gráficos de deformação e tensão apresentados, além disso, pôde-se determinar o coeficiente angular e o coeficiente linear através das envoltórias, que podem ser transformados em ângulo de atrito e coesão respectivamente. A tabela X a seguir mostra os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de acordo com a deformação axial, tanto para os RSU novos como para os antigos:

Tabela 18 - Parâmetros de Resistência das Amostras de RSU Novos e Antigos

Amostra	ϵ_s (%)	Equação (kPa)	R^2	Parâmetros	
				c' (kPa)	Φ' (°)
NovoCD10sat	5	$t = 0,2552 s' + 6,61$	1,000	6,8	14,8
	10	$t = 0,3455 s' + 10,66$	1,000	11,4	20,2
	15	$t = 0,4098 s' + 16,01$	0,999	17,6	24,2
	20	$t = 0,4906 s' + 23,01$	0,995	25,8	27,1
4anosCD10sat	5	$t = 0,2475 s' + 5,79$	0,997	6,0	14,3
	10	$t = 0,3684 s' + 8,31$	0,995	8,9	21,6
	15	$t = 0,4650 s' + 7,28$	0,999	8,2	27,7
	20	$t = 0,5725 s' + 4,05$	1,000	4,6	34,9

Fonte: Nascimento, 2007

c) *Aterro Sanitário de Muribeca (PE)*

Motta (2011) realizou ensaios de cisalhamento direto com amostras deformadas de resíduos pré-tratados mecanicamente, com e sem adição de lodo, provenientes do Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) Igarassu que passou a receber resíduos dos municípios de Recife, Olinda e Igarassu após o encerramento das atividades do Aterro Sanitário de Muribeca durante sua pesquisa.

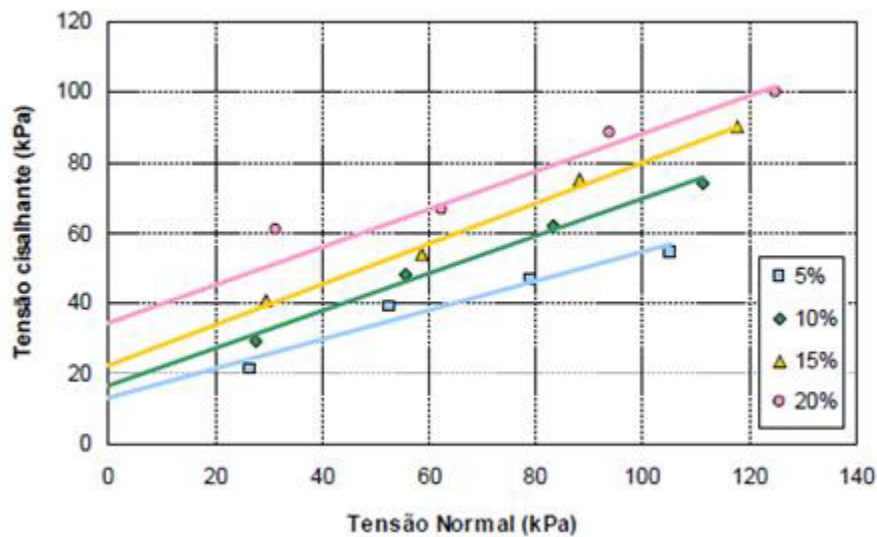
Figura 15 - Localização do CTR Igarassu e do Aterro Sanitário de Muribeca



Fonte: Motta, 2011

Os corpos de prova foram moldados em uma caixa de cisalhamento de grandes dimensões de seção quadrada de $0,36 \text{ m}^2$ ($0,6 \times 0,6 \text{ m}$) e uma altura total de $0,6 \text{ m}$. Com relação a velocidade de cisalhamento dos ensaios, foi calculado o valor em torno de $2,4 \text{ mm/min}$. Os ensaios foram submetidos aos deslocamentos horizontais de 5, 10, 15 e 20%.

Gráfico 17 - Envoltórias de Resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal



Fonte: Motta, 2011

Todas as amostras apresentaram comportamento de redução do volume devido ao alto número de vazios dos resíduos. Além disso, foi analisado um ganho de resistência com o aumento do deslocamento horizontal. O gráfico 17 foi usado para a determinação dos parâmetros de resistência apresentados na tabela 19, onde pode-se observar que os valores de coesão aumentam com o nível de deslocamento, enquanto os valores para os ângulos de atrito atingem o máximo no valor de 15% de deslocamento horizontal e com tendência a constância para valores de deslocamento horizontal acima de 10%.

Tabela 19 - Parâmetros de Resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal

PARÂMETROS	NÍVEIS DE DESLOCAMENTO			
	5%	10%	15%	20%
c' (kPa)	13,3	16,5	22,6	34,3
ϕ' (°)	22	28	30	28
R^2	0,948	0,998	0,992	0,971

Fonte: Motta, 2011

5. Análise de Resultados

5.1 Composição Gravimétrica

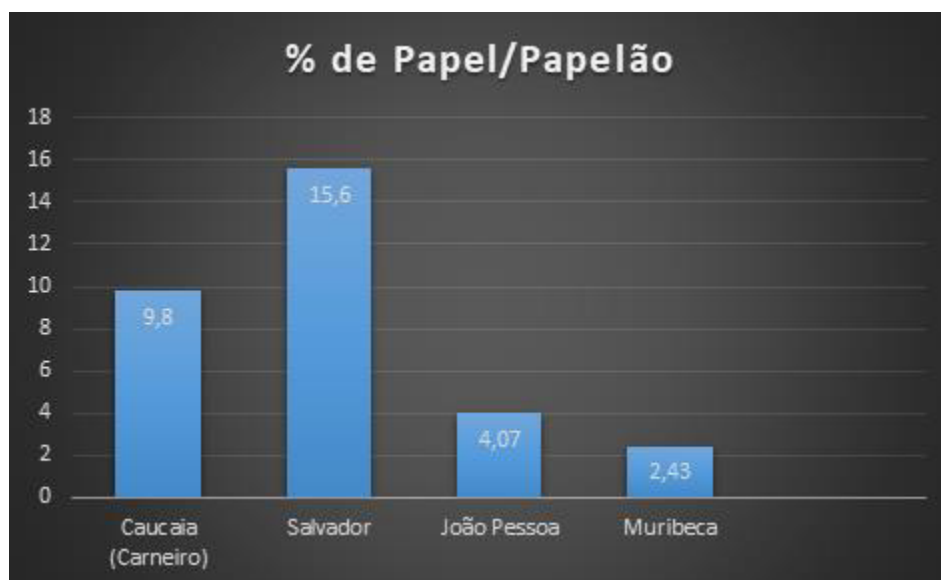
Os dados colhidos de pesquisas anteriores, sobre os aterros sanitários em questão, possibilitaram a comparação de dados e, conseqüentemente, análises a respeito das características físicas entre os mesmos.

Com relação aos valores do Aterro Sanitário de Altinho, não houve consolidação de dados já que os percentuais gravimétricos não foram avaliados de forma total no aterro, mas sim, no formato individual de cada município que contribuía para a destinação final de seus RSU no aterro em Altinho, Pernambuco.

a) Papel/Papelão

O gráfico 18 a seguir mostra um comparativo para a porcentagem de papel e papelão nos aterros sanitários estudados:

Gráfico 18 - Porcentagem de papel/papelão dos aterros



Fonte: Autor

O Aterro Metropolitano Centro (Salvador) possui um valor elevado de papel e papelão na sua composição gravimétrica, que pode aumentar a fração pastosa com o passar do tempo, quando comparado aos demais aterros. Esse

fato deve levar em consideração que os valores baixos de papel e papelão podem estar relacionados com o fato da coleta dos resíduos nos demais aterros terem ocorrido em tempos que se consideram os resíduos como velhos, como é o caso do Aterro Sanitário de Muribeca (coleta em células com 10 anos de funcionamento), ou seja, já degradados e de difícil identificação, porém em condições de pré-aterro o percentual era de 14,20 % (MACIEL, 2009) representando uma queda de 82,8% em 10 anos.

b) Matéria Orgânica

O gráfico 19 mostra um comparativo para a porcentagem de matéria orgânica nos aterros sanitários estudados:

Gráfico 19 - Porcentagem de Matéria Orgânica dos Aterros



Fonte: Autor

O gráfico 19 mostra que na pesquisa de Carneiro (2013), sobre o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste Caucaia no Estado do Ceará, os valores de matéria orgânica, presentes na composição gravimétrica, são superiores aos demais aterros estudados neste trabalho. Carneiro (2013) menciona que o teor de matéria orgânica está relacionado ao desenvolvimento da região, quando se trata de desenvolvimento econômico, essa relação pode ser comprovada

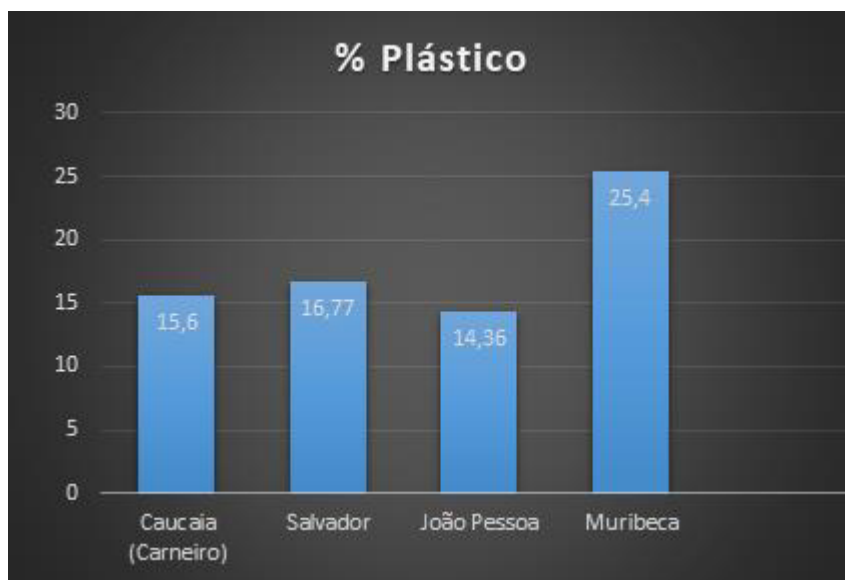
analisando a Receita Orçamentária Realizada de cada Estado, pois o Ceará, que tem o maior teor de matéria orgânica, possui um valor de R\$24.608.352,18, enquanto a Bahia, que tem o menor teor de matéria orgânica, possui uma Receita Orçamentária de R\$ 50.191.003,24 (IBGE, 2017).

Outro fator preponderante para um percentual de matéria orgânica é o tempo de deposição em que os RSU se encontram aterrados. A matéria orgânica se reduz ao longo do tempo, devido ao processo de biodegradação, aumentando a fração pastosa dos RSU. Esse fato pode ser evidenciado no gráfico 19, já que, para o aterro sanitário localizado em Caucaia, a gravimetria foi realizada em uma célula experimental construída para pesquisa, ou seja, com RSU novos, enquanto que, para o aterro sanitário em Muribeca, as amostras para a gravimetria dataram de RSU antigos, aterrados a 10 anos.

c) Plástico

O gráfico 20 a seguir mostra um comparativo para a porcentagem de plástico nos aterros sanitários estudados:

Gráfico 20 - Porcentagem de Plástico dos Aterros



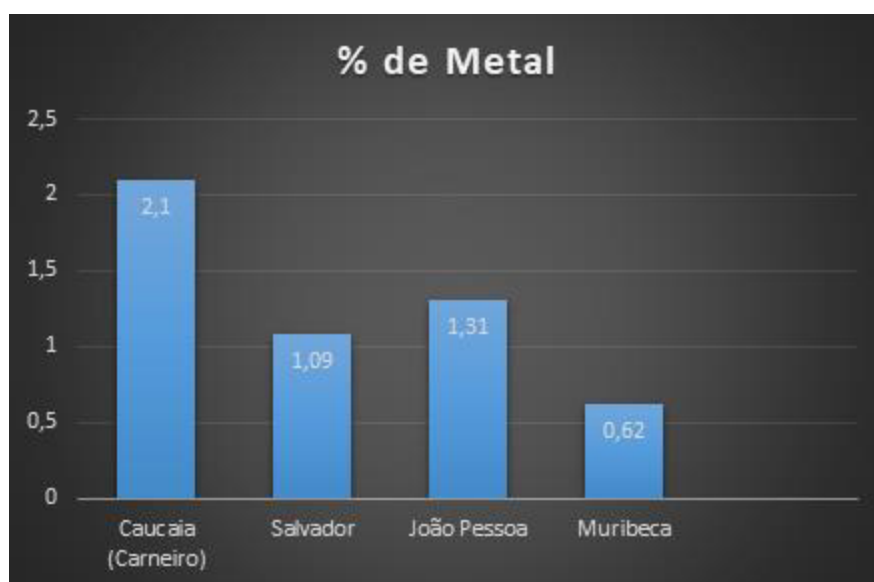
Fonte: Autor

O gráfico 20 mostra o alto valor percentual de plástico na composição gravimétrica do Aterro Sanitário de Muribeca (ASM), com 25,4 %, valor bem elevado quando comparado aos dados fornecidos por Motta (2011) em um panorama geral sobre a composição gravimétrica no mundo. O alto teor de plástico é uma variável que influencia diretamente no aumento da resistência ao cisalhamento direto como foi comprovado por Funcale (2005) em seu trabalho sobre a influência dos componentes de reforço na resistência dos RSU, definindo como elementos de reforço (fibras) o plástico, galhos, madeira e tecidos. Conseqüentemente, espera-se que os valores de resistência ao cisalhamento direto sejam maiores para amostras do ASM do que para o Aterro Sanitário Municipal de João Pessoa, por exemplo.

d) Metal

O gráfico 21 a seguir mostra um comparativo para a porcentagem de metal nos aterros sanitários estudados:

Gráfico 21 - Porcentagem de Metal dos Aterros



Fonte: Autor

Para todos os aterros sanitários estudados, o metal é um componente de baixo percentual na composição gravimétrica, logo, não há características

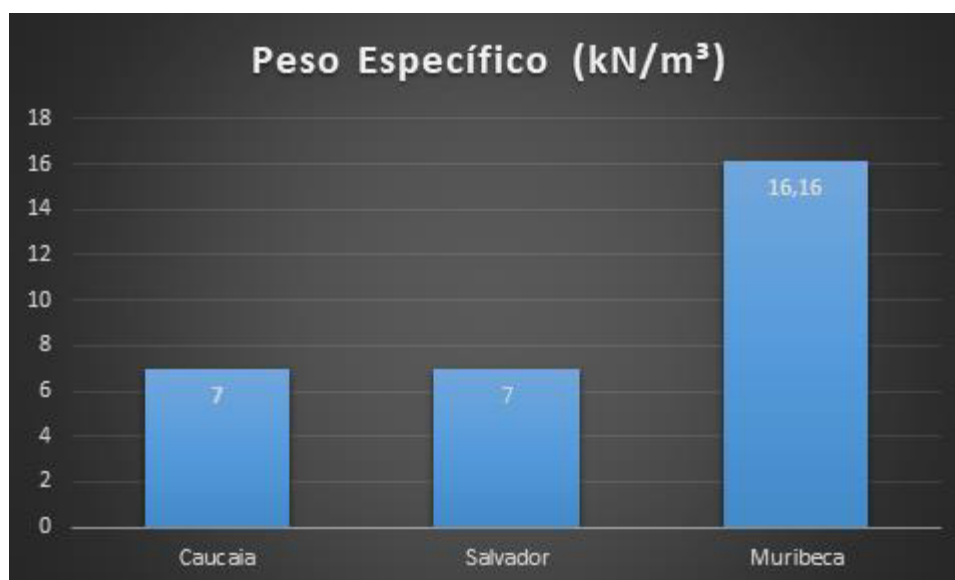
significativas, que o material em questão, gere ao aterro e as células que o compõe, diferente dos componentes fibrosos que estão diretamente ligados a resistência ao cisalhamento direto, como já foi mencionado anteriormente.

5.2 Peso Específico

Com relação ao índice físico “peso específico” dos aterros, até então, selecionados para o estudo, apenas os aterros localizados em Caucaia, Salvador e Muribeca tiveram seus dados coletados para um estudo comparativo. Os demais aterros aqui presentes na pesquisa possuem alguns dados com maior grau de dificuldade para serem levantados e, por esse fator, não se farão presentes na comparação entre pesos específicos.

Pelo Gráfico 22, observa-se que os valores de peso específico dos aterros sanitários de Caucaia e Salvador possuem um mesmo valor. Interessante ressaltar que apesar de ambos terem obtido amostras de RSU em condições novas, na pesquisa de Nascimento (2007) teve o valor do peso específico definido antes do processo de obtenção de forma mecânica por meio de um consolidômetro.

Gráfico 22 - Comparação entre Pesos Específicos



Fonte: Autor

A condicionante tempo também foi uma variável com influência direta sobre o valor dos pesos específicos pois, para Muribeca, as amostras se encontravam na condição de “Aterro Antigo” já que estavam com 10 anos de deposição na célula, logo fatores como a biodegradação e o peso de outras camadas do aterro foram condições para o alto valor de peso específico (16,16 kN/m³) já que são variáveis responsáveis pela redução do volume.

5.3 Distribuição Granulométrica

Para análise e comparação da distribuição granulométrica considerou-se apenas os Aterros Sanitários ASMOC, ASMC e ASM devido às dificuldades em encontrar dados e estudos sobre os outros aterros abordados neste trabalho.

O comparativo foi feito para a quantidade, em percentual, das amostras de RSU que passaram na peneira de número 200, ou seja, aquela que possui um diâmetro de 0,074 mm, caracterizando a quantidade da amostra como siltes e argilas.

O gráfico 23 a seguir mostra, em percentual, os valores correspondentes as quantidades da amostra que passaram na peneira de número 200 para cada aterro especificado.

Gráfico 23 - Percentuais de passagem na peneira de nº 200



Fonte: Autor

Como se consta no gráfico 23 que compara o percentual de finos que passam na peneira de número 200, os valores são bem próximos apesar de Muribeca possuir uma quantidade de finos maior, fato que pode ser justificado pela utilização de amostras com 10 anos de deposição, ou seja, em condição de “Aterro Antigo”, onde já houve um processo maior de biodegradação.

5.4 Resistência ao Cisalhamento

Os parâmetros “coesão” e “ângulo de atrito” foram dados coletados de três aterros sanitários estudados neste trabalho, Aterro Sanitário Municipal Oeste Caucaia (Ceará), Aterro Sanitário Metropolitano Centro (Bahia) e Aterro Sanitário de Muribeca (Pernambuco). Os parâmetros em questão nos demais aterros, que compõe este estudo, não foram encontrados ao longo da pesquisa e por isso, não serão abordados nas estatísticas a seguir.

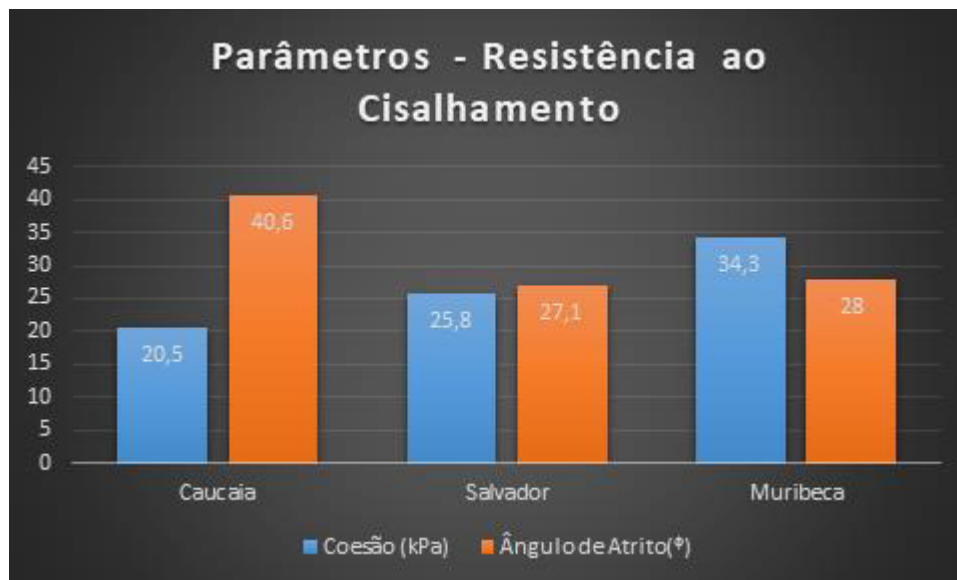
Tanto os valores de coesão como de ângulo de atrito que serão analisados a seguir, são referentes a um deslocamento axial de 20%, o valor adotado foi definido para que houvesse uma comparação em condições mais próximas possíveis entre um aterro e outro.

Tabela 20 - Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento dos aterros

Parâmetros - Resistência ao Cisalhamento			
	ASMOC	ASMC	ASM
Coesão (kPa)	20,5	25,8	34,3
Ângulo de Atrito(ϕ)	40,6	27,1	28

Fonte: Autor

Gráfico 24 - Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento dos aterros

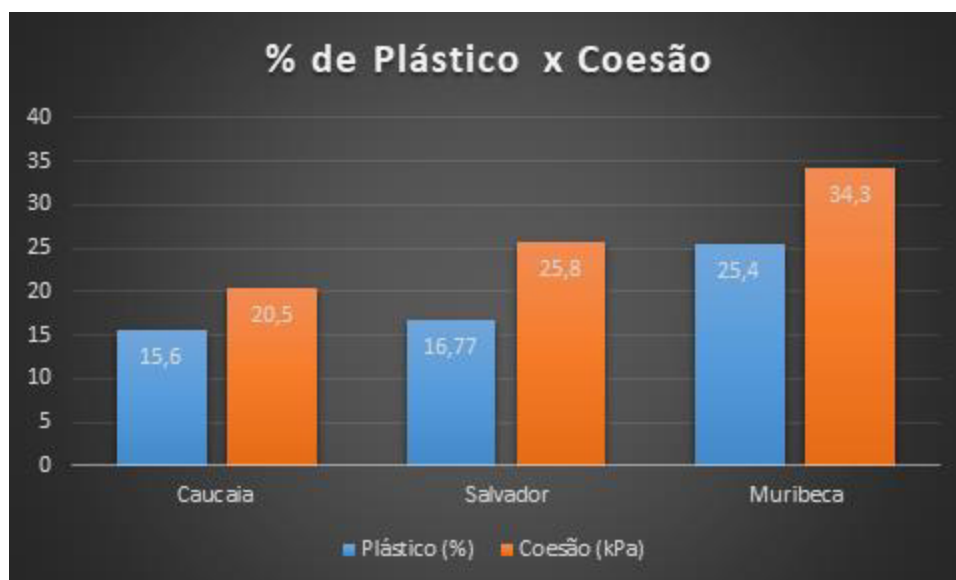


Fonte: Autor

Conforme observa-se no gráfico 24, o ASMOC apresentou um ângulo de atrito mais elevado em relação aos demais aterros, sendo característico de solo granular comprovado pelo baixo valor de coesão. O valor de ângulo de atrito pode ser justificado pelo tempo de deposição das amostras (15 anos). Já para o Aterro Sanitário de Muribeca (ASM), o valor mais elevado no intercepto coesivo, com relação aos demais aterros, é devido presença de plástico e outros componentes fibrosos como a fibra de coco, que atuam como fibras na massa do RSU.

O gráfico 25 a seguir mostra como os valores de teor de plástico no percentual gravimétrico estão relacionados com os valores de coesão pois, observa-se que para valores maiores de plástico, nos aterros sanitários em questão, há um valor mais elevado no intercepto coesivo.

Gráfico 25 - Comparativo entre os percentuais de plástico e os valores de coesão



Fonte: Autor

Com relação ao Aterro Sanitário Metropolitano Centro, os valores expressos no gráfico são para amostras de resíduo novo, pois após um certo tempo houve redução do valor de coesão e aumento do coeficiente de atrito como pode-se verificar na tabela 21 a seguir:

Tabela 21 - Parâmetros de Resistencia ao longo do tempo

Parâmetros - Resistência ao Cisalhamento		
	4 Anos	Novo
Coesão (kPa)	4,6	25,8
Ângulo de Atrito	34,9	27,1

Fonte: Autor

Por fim, nota-se que os valores de ângulo de atrito, para os aterros estudados, obtiveram uma variância significativa entre 27 e 41. Observou-se que para amostras de RSU com maior tempo de deposição possuem, então, um ângulo de atrito maior quando comparados as amostras de RSU com menos tempo de aterro, fato comprovado pelo gráfico 25, já que dentre os aterros

analisados, o de Salvador teve as amostras com menor tempo de deposição e o aterro em Caucaia com o maior tempo de deposição.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou agrupar informações sobre os parâmetros geotécnicos de aterros sanitários da região Nordeste do Brasil para que possam ser consultados e, eventualmente, utilizados em pesquisas futuras, como por exemplo, em análises de estabilidade de taludes, uso de dados de composição gravimétrica dos resíduos, etc.

A partir da consulta de trabalhos publicados na literatura foram coletados dados de composição, peso específico, granulometria e parâmetros de resistência de 5 aterros selecionados para a região de estudo. Foi possível obter faixas de variações de determinados parâmetros geotécnicos e relações com a composição do aterro e parâmetros de resistência.

A maior dificuldade da pesquisa residiu na escassez de dados geotécnicos sobre aterros sanitários da região Nordeste, sendo que muitos dos trabalhos consultados não apresentaram alguns parâmetros ou estes não foram estudados. No entanto, os parâmetros obtidos permitiram definir faixas de variação e estabelecer relações destes com a composição e tempo de deposição. Estes resultados se limitam a quantidade de amostras analisadas.

Os processos de degradação aos quais os RSU estão expostos dificultam o processo de separação e a definição da composição dos resíduos, uma vez que o resíduo “novo”, possui uma característica distinta do resíduo decomposto. Neste último há a formação de uma fração pastosa. Dentro deste contexto, nos trabalhos consultados, cada autor adotou diferentes sistemas de definição da composição dos resíduos. Sugere-se uma padronização, definindo-se inicialmente, os resíduos como “novos” (recém aterrados) ou “antigos” (já decompostos e com certo período de deposição). Em ambas classificações deve haver uma distinção dos elementos principais que compõe o resíduo, tais como metal, plástico, papel/papelão, madeira, solo, vidro e matéria orgânica, etc., e outros (materiais que não se enquadrem nos componentes principais). A distinção entre as classificações ocorreria na determinação do teor de matéria orgânica. Em resíduos “novos” a determinação de matéria orgânica ocorreria pela metodologia da gravimetria por separação manual enquanto que nos “antigos”, em que há a formação de uma massa pastosa, de difícil distinção do material orgânico da parcela inorgânica, a separação poderia ser feita com o uso

de mufla. A adoção de uma classificação única facilitaria a comparação e a obtenção de relações da composição com outros parâmetros geotécnicos.

Além disso, observou-se um baixo número de amostra para a representação dos parâmetros estudados nos aterros sanitários, que podem não ser suficiente para definir as características geotécnicas do aterro, que possui grande heterogeneidade. Fatores tais como profundidade das localizações das amostras retiradas, tempo de degradação, precisam ser melhores definidos.

A seguir serão apresentadas as conclusões obtidas para cada índice físico analisado:

a) Percentual de matéria orgânica

Observou-se uma redução significativa do valor percentual de matéria orgânica, com o passar dos anos nas células de RSU dos aterros, esse fato é devido ao processo de biodegradação e pode ser considerado um fator determinante para a consideração de aterros em estado de "Aterro Antigo". A redução temporal é significativa e apesar de a matéria orgânica ser um dos componentes mais presentes nos aterros sanitários do Nordeste, ela chega a valores inferiores a 20% se um período de deposição maior do que 10 anos.

b) Peso específico

Com relação ao peso específico, pode-se comprovar que os resultados dos ensaios dependem não só das condições temporais do aterro como, também, da metodologia para a determinação, pois o uso de dimensões pequenas pode influenciar nos resultados finais, conduzindo a valores não representativos. O fato é comprovado pois, em amostras com pouco tempo de deposição, encontrou-se o valor de 7 kN/m^3 enquanto que para amostras com mais de dez anos o peso específico chegou a um valor acima de 16 kN/m^3 .

c) Distribuição granulométrica

Os valores de distribuição granulométrica analisados não foram suficientes para se encontrar uma faixa de variação para os aterros do Nordeste devido a escassa quantidade de dados deste índice físico para os demais aterros estudados. No entanto, com relação ao teor de finos, observou-se que para amostras com pouco tempo de deposição havia uma variância entre 4 a 5% de

teor de finos, enquanto que para amostras com maior tempo de deposição (10 anos) e, conseqüentemente, maior biodegradação esse valor aumentava para um percentual acima de 7%.

d) Parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo)

Com relação a resistência ao cisalhamento direto observou-se uma influência significativa entre o percentual de plástico e os valores de coesão, para aquelas amostras em que o percentual gravimétrico de plástico fosse mais significativo observava-se um valor maior de intercepto coesivo. Além disso, materiais fibrosos como coco e tecidos também tiveram efeito de elevação do valor de coesão.

Com relação ao ângulo de atrito, observou-se que para deformações axiais no valor de 20% houveram valores maiores para resíduos sólidos urbanos com um maior tempo de deposição, sendo então, decisivos para a análise de resistência de taludes, por exemplo.

As faixas de variação entre os valores de ângulo de atrito e de coesão foram significativas, fato que se comprovou com a variação entre 20 a 35 kPa para a coesão e 28 a 40° para o ângulo de atrito.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de limpeza pública e resíduos especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no brasil 2018/2019**. São Paulo, 2019.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de limpeza pública e resíduos especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no brasil 2012**. São Paulo, 2012.
- ATERRO sanitário vira lixão e causa dano ambiental em Alagoinhas. **Correio 24 Horas**, Salvador, 9 de abril de 2018. Disponível em: <https://www.correio24horas.com.br/noticia/nid/aterro-sanitario-vira-lixao-e-causa-dano-ambiental-em-alagoinhas/>. Acesso em: 29 de abril de 2020.
- AZEVEDO, G. S. **Estimativa da geração de biogás no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa através do teste de BMP**. 2012. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.
- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p.
- CALLE, J. A. C. **Comportamento geomecânico de resíduos sólidos urbanos**. 2007. Tese – Programa de Pós Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- CARNEIRO, A. A. **Estudo da capacidade de carga de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos com base em ensaios de laboratório e campo**. 2013. Dissertação – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 1999. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- ESTADOS UNIDOS. Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas. **Relatório do desenvolvimento humano 2014**. Nova Iorque, EUA, 2014. 247 p. Disponível em: <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/library/idh/relatorios-de->

[desenvolvimento-humano/relatorio-do-desenvolvimento-humano-200013.html](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X10003934). Acesso em: 30 de maio de 2020.

- EVALUATION of the geotechnical properties of MSW in two Brazilian landfills. **Waste Management**, São Paulo, 9 de setembro de 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X10003934>. Acessado em: 30 de maio de 2020.
- FUNCALE, S. P. **Influência dos componentes de reforço na resistência de resíduos sólidos urbanos**. 2005. Tese – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.
- LINARD, A. F. G. **Análise do aproveitamento energético do biogás do aterro sanitário metropolitano oeste em Caucaia sob a perspectiva do mecanismo de desenvolvimento limpo**. 2010. Dissertação – Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.
- MACIEL, F. J. **Geração de Biogás e Energia em Aterro Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2009. Tese (doutor em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- MARQUES, A. C. M. **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos**. 2001. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- MATIAS, G. A. **Refuncionalização de solo contaminado por resíduos sólidos urbanos em áreas de aterro sanitário**. 2018. Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- MELO, F. H. F. A. **Caracterização e estudo do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos em um consórcio municipal do estado de Pernambuco**. 2015. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2015.
- MIRANDA, A. M. **Estudo do peso específico de resíduos sólidos urbanos**. 2004. Tese – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

- MOTTA, E. Q. **Avaliação da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos com codisposição de lodo de tratamento de esgoto através de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões**. 2011. Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.
- MUNICIPAL solid waste shear strength parameters defined through laboratorial and in situ tests. **Journal of the Air & Waste Management Association**, Londres, 18 de Outubro de 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2013.813876>. Acessado em: 22 de maio de 2020.
- NASCIMENTO, J. C. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 2007. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- NOBERTO, A. S. **Avaliação da adição de fibras na resistência ao cisalhamento na matriz fina de resíduos sólidos**. 2019. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.
- OLIVEIRA, C. A. A. **Análise do fluxo de gases na camada de cobertura do aterro sanitário municipal oeste de Caucaia (Asmoc)**. 011. Dissertação – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE SALVADOR. Limpurb. **Tratamento e Destino final**. Disponível em: <http://www.limpurb.salvador.ba.gov.br/index.php/servicos/42-tratamento-e-destino-final>.
- SANTOS, G.O. et al. **Estimativa da quantidade de resíduos sólidos urbanos coletados em Fortaleza e destinados ao aterro sanitário de Caucaia (Ceará)**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso – Programa de Pós-Graduação em Educação Ambiental, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2008.
- SILVA, R. A. C. **Avaliação da evolução do comportamento geomecânico de aterros sanitários com base na realização de**

ensaios de laboratório e de campo. 2017. Tese – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

- SILVESTRE, G. D. Apresentação e monitoramento das atividades operacionais no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa – ASMJP. *In: SEMINÁRIO DA REGIÃO NORDESTE SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2., 2010, João Pessoa. Anais...João Pessoa: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2010. p. 1.*
- Zanta, V. M., & Ferreira, C. F. A. (2003). Gerenciamento integrado de resíduos sólidos. In A. B. Castilhos (Ed.), Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Rio de Janeiro: ABES-RiMa.