

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

NATHÁLIA DELAGE SOARES

**RESISTÊNCIA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE
COMPACTAÇÃO E PRESENÇA DE PLÁSTICOS MOLES**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

NATHÁLIA DELAGE SOARES

**RESISTÊNCIA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE
COMPACTAÇÃO E PRESENÇA DE PLÁSTICOS MOLES**

Dissertação apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Rejane Nascentes
Coorientador: Roberto Lopez Ferraz

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S676r
2021
Soares, Nathália Delage, 1996-
Resistência dos resíduos sólidos urbanos em função do
nível de compactação e presença de plásticos moles / Nathália
Delage Soares. – Viçosa, MG, 2021.
1 dissertação eletrônica (135 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Rejane Nascentes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2021.

Referências bibliográficas: f. 132-135.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2021.187>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Aterro sanitário. 2. Taludes (Mecânica do solo) -
Estabilidade. 3. Resistência de materiais - Testes. 4. Mecânica do
solo. I. Nascentes, Rejane, 1977-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 628.445

Bibliotecário(a) responsável: Renata de Fátima Alves CRB6/2578

NATHÁLIA DELAGE SOARES

**RESISTÊNCIA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE
COMPACTAÇÃO E PRESENÇA DE PLÁSTICOS MOLES**

Dissertação apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 03 de agosto de 2021.

Assentimento:



Nathália Delage Soares
Autora



Rejane Nascentes
Orientadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela concretização de mais uma etapa em minha vida e entrego em Suas mãos o meu futuro, pois sei que tens o melhor para mim.

Aos meus pais, Luciene e Amarildo, a quem agradeço por serem os pais maravilhosos e carinhosos que são e por não medirem esforços para que eu chegasse até aqui.

A toda minha família, que torceram por minha conquista, sempre com muito carinho, apoio constante e incentivo.

Ao Gustavo pelo amor, cuidado e dedicação.

Aos professores Rejane Nascentes e Roberto Ferraz pela boa vontade, apoio e incentivo durante a realização deste trabalho. Excelentes professores e exemplos de profissionais a serem seguidos.

Aos funcionários do Laboratório, Marcelo, Fabiola e Anderson, por não medirem esforços para que este trabalho pudesse ser realizado.

Aos funcionários do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Viçosa (SAAE) por todo o suporte dado para que esta pesquisa se concretizasse.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil, pelos ensinamentos ministrados no curso.

Aos amigos da Pós-Graduação em Engenharia Civil, pelos momentos de descontração e amizade.

À Universidade Federal de Viçosa por me proporcionar a oportunidade de participar do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

Ao CNPQ pelo incentivo à pesquisa, pelas oportunidades e pela bolsa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Enfim, a todos que, de alguma maneira, estiveram envolvidos e contribuíram na minha trajetória durante esses anos de mestrado em Viçosa.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.
(Albert Einstein)

RESUMO

SOARES, Nathália Delage, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2021, **Resistência dos Resíduos Sólidos Urbanos em função do nível de Compactação e presença de Plásticos Moles**. Orientadora: Rejane Nascentes. Coorientador: Roberto Lopez Ferraz.

O aumento das taxas de geração de resíduos é um fenômeno que vem acontecendo em todo o mundo e passou a ser um problema que afeta a sociedade e o poder público. No Brasil, a forma de disposição do lixo ambientalmente adequada mais utilizada é o aterro sanitário. No entanto, a escassez de áreas para disposição de resíduos cria a necessidade do aumento da capacidade volumétrica de aterros sanitários em operação ou na reutilização de antigas áreas de disposição encerradas. Com isso, tem-se construído aterros cada vez mais altos, reduzindo o problema da demanda de resíduos e, por outro lado, gerando preocupações quanto à estabilidade destes maciços. Dentro desse contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar a relação que a compactação e o aumento do peso específico dos resíduos têm com os parâmetros de resistência e o efeito de reforço causado pela presença de plásticos moles nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) do município de Viçosa. Para tanto, foi desenvolvido um equipamento que permite realizar o ensaio de talude de resíduos de forma que fosse possível definir com certa precisão o momento da ruptura, a tensão e a superfície de ruptura. Em seguida, eram feitas retroanálises dessas condicionantes por meio do uso do *software* de estabilidade de maciços SLIDE 2D e, assim, eram determinados os parâmetros de resistência. Ao todo foram realizados 23 ensaios, com 4 níveis de compactação diferentes e com os teores de plásticos em 0%, 3%, 6% e no teor natural encontrado na gravimetria do resíduo (11,2%). Ao final do trabalho foi possível observar que a compactação dos resíduos é um passo importante a ser adotado nos aterros sanitários, gerando um aumento na resistência dos taludes de resíduo, pois ao aumentar o peso específico de 4 kN/m³ para 7 kN/m³ houve um aumento de 1194% na tensão de ruptura média. Pôde-se notar que a presença de plásticos moles altera as características dos resíduos e confirma a teoria de que esse material atua como um tipo de fibra, aumentando a sua resistência ao cisalhamento, já que ao diminuir o teor de plásticos para 0% a tensão de ruptura média apresentou uma redução de 70% na resistência, quando comparamos com o teor de plásticos natural do RSU (11,2%). Nas retroanálises realizadas no *software* de estabilidade de maciços os valores encontrados para a coesão variaram de 0 a 2,5 kPa e o ângulo de atrito variou de 0° a 43,9°. Por fim, chegou-se à conclusão de que os fatores discutidos neste trabalho afetam diretamente a resistência dos

resíduos e destaca-se que a grande dificuldade no estudo e na interpretação de resultados de ensaios com resíduos sólidos urbanos está associada com a heterogeneidade do material, o qual apresenta diferentes tipos e dimensões de constituintes e componentes que podem degradar com o tempo.

Palavras-chave: Aterro Sanitário. Estabilidade de Taludes. Parâmetros de Resistência. Retroanálise.

ABSTRACT

SOARES, Nathália Delage, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August 2021. **Strength of Solid Urban Waste as a function of the level of Compaction and the presence of Soft Plastics**. Adviser: Rejane Nascentes. Co-Adviser: Roberto Lopez Ferraz.

The increase in waste generation rates is a phenomenon that has been happening all over the world and has become a problem that affects society and public authorities. In Brazil, the most used form of disposal of waste that is environmentally adequate is the sanitary landfill. However, the shortage of areas for waste disposal creates the need to increase the volumetric capacity of landfills in operation or in the reuse of old closed disposal areas. With this, increasingly taller landfills have been built, reducing the problem of waste demand and, on the other hand, generating concerns about the stability of these masses. In this context, the objective of this work was to study the relationship that compaction and increased specific weight of waste have with the strength parameters and the reinforcement effect caused by the presence of soft plastics in Solid Urban Waste (USW) in the municipality of Viçosa. For this purpose, equipment was developed to carry out the residue slope test so that it would be possible to define with some precision the rupture moment, the tension and the rupture surface. Then, back-analysis of these conditions was carried out using the SLIDE 2D slope stability software and, thus, the resistance parameters were determined. A total of 23 tests were carried out, with 4 different compaction levels and with plastic contents at 0%, 3%, 6% and in the natural content found in the gravimetry of the residue (11.2%). At the end of the work, it was possible to observe that the compaction of waste is an important step to be taken in landfills, generating an increase in the resistance of the waste slopes, because when increasing the specific weight from 4 kN/m³ to 7 kN/m³ there was a 1194% increase in the average breaking strength. It can be noted that the presence of soft plastics alters the characteristics of the waste and confirms the theory that this material acts as a type of fiber, increasing its shear strength, since by decreasing the plastic content to 0% the tension of medium rupture showed a 70% reduction in strength, when compared with the natural plastics content of MSW (11.2%). In the retroanalyses carried out in the massif stability software, the values found for cohesion ranged from 0 to 2.5 kPa and the friction angle ranged from 0° to 43.9°. Finally, it was concluded that the factors discussed in this work directly affect the strength of the waste and it is highlighted that the great difficulty in the study and interpretation of test results with urban solid waste is associated with the heterogeneity of the

material, which presents different types and dimensions of constituents and components that can degrade over time.

Keywords: Landfill. Slope Stability. Strength Parameters. Back-Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estimativa de massa coletada no país segundo macrorregião geográfica	22
Figura 2- Disposição final de RSU nas regiões (%)	23
Figura 3- Ilustração do esquema de funcionamento de um lixão ou vazadouro	24
Figura 4- Ilustração do esquema de funcionamento de um aterro controlado.....	25
Figura 5- Representação esquemática da seção transversal de um aterro sanitário	27
Figura 6- Variação do peso específico com a profundidade	32
Figura 7- Diâmetros equivalentes dos componentes do RSU	33
Figura 8- Distribuição granulométrica de RSU para diferentes idades	34
Figura 9- Umidade para RSU	36
Figura 10- Coeficiente de permeabilidade do RSU em função da profundidade	39
Figura 11- Variação da temperatura do RSU com a profundidade	40
Figura 12- Variação da temperatura do RSU com a profundidade	41
Figura 13- Medidas de recalques de superfície de diferentes aterros.....	43
Figura 14- Relação tensão <i>versus</i> deformação típica dos RSU	47
Figura 15- Comportamento tensão deformação dos RSU: (a) tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial; (b) deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial.....	48
Figura 16- Cuvas de tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal para resíduos com fibras	48
Figura 17- Curvas de tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal para resíduos sem fibras	49
Figura 18- Resistência ao cisalhamento direto do aterro sanitário Tri-Cities: (a) curva de resistência desenvolvida para amostras com composição variável de resíduos; b) variação do ângulo de atrito com aumento da tensão normal assumindo $c = 5$ kPa.....	50
Figura 19- Ensaio de compressão triaxial para amostras com diferentes composições de resíduos.....	51
Figura 20- Comparação dos resultados dos testes de cisalhamento direto para amostras em que as fibras são orientadas paralelamente ou perpendicularmente a superfície de cisalhamento horizontal.....	52

Figura 21- Efeito do peso específico na resistência ao cisalhamento de amostras com 62% de material menor que 20 mm, em peso, com tensão normal de 150 kPa	53
Figura 22- Parâmetros de Resistencia em função da deformação e do peso específico.....	55
Figura 23- Curva Coesão <i>versus</i> Ângulo de Atrito	56
Figura 24- Envoltória de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal para resíduo com fibras variando o deslocamento	57
Figura 25- Envoltória de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal para resíduo sem fibras.....	57
Figura 26- Faixa de valores de parâmetros de resistência dos RSU recomendados: (a) segundo Bouazza e Wojnarowicz, 1999; (b) segundo Sanchez-Alciturri et al., 1993, modificado por Lamare Neto, 2004	60
Figura 27- Forças atuantes em uma fatia de solo	61
Figura 28 - Localização do município de Viçosa- MG	63
Figura 29- Bairros de Viçosa - MG	64
Figura 30- Renda Familiar por Região Urbana de Planejamento em Viçosa - MG.....	65
Figura 31- Esquema do equipamento desenvolvido para realização da capacidade de carga em um talude de RSU.....	66
Figura 32- Vista geral do equipamento para realização dos ensaios.....	68
Figura 33- Detalhe da régua milimetrada utilizada para a medição dos deslocamentos verticais	69
Figura 34- Processo de quarteamento - abertura dos sacos e sacolas.....	71
Figura 35- Processo de quarteamento - homogeneização do resíduo.....	72
Figura 36- Processo de quarteamento - separação em quatro partes iguais	72
Figura 37- Processo de quarteamento - amostra restante após descarte de metade da amostra inicial	73
Figura 38- Caracterização dos resíduos na mesa de triagem.....	74
Figura 39- Caracterização dos resíduos na mesa de triagem.....	75
Figura 40- Demarcação da caixa em faixas de 15 cm	76
Figura 41- Compactação do resíduo nas camadas.....	77

Figura 42- Desprendimento dos resíduos da parede da caixa oposta ao talude	78
Figura 43- Deslocamento da sapata no sentido da superfície de ruptura	79
Figura 44- Esquema para calcular a superfície de ruptura	80
Figura 45- Especificação das coordenadas de centro de ruptura, do ponto b e da sobrecarga no programa SLIDE	80
Figura 46- Composição gravimétrica do RSU de Minas Gerais	83
Figura 47- Detalhe da ruptura do Ensaio 1 (PE4 - 4kN/m ³).....	85
Figura 48- Detalhe da ruptura do Ensaio 2 (PE4 - 4kN/m ³).....	86
Figura 49- Detalhe da ruptura do Ensaio 3 (PE4 - 4kN/m ³).....	86
Figura 50- Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento (PE4 - 4kN/m ³).....	87
Figura 51- Regressão entre Coesão e Tangente do Ângulo de Atrito (PE4 - 4kN/m ³)	88
Figura 52- Detalhe da ruptura do Ensaio 4 (PE5 - 5kN/m ³).....	89
Figura 53- Detalhe da ruptura do Ensaio 5 (PE5 - 5kN/m ³).....	90
Figura 54- Detalhe da ruptura do Ensaio 6 (PE5 - 5kN/m ³).....	90
Figura 55- Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento (PE5 - 5kN/m ³).....	91
Figura 56- Regressão entre Coesão e Tangente do Ângulo de Atrito (PE5 - 5kN/m ³)	92
Figura 57- Detalhe da ruptura do Ensaio 7 (PE6 - 6kN/m ³).....	93
Figura 58- Detalhe da ruptura do Ensaio 8 (PE6 - 6kN/m ³).....	94
Figura 59- Detalhe da ruptura do Ensaio 9 (PE6 - 6kN/m ³).....	94
Figura 60- Detalhe da ruptura do Ensaio 10 (PE6 - 6kN/m ³).....	94
Figura 61- Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento (PE6 - 6kN/m ³).....	95
Figura 62- Regressão entre Coesão e Tangente do Ângulo de Atrito (PE6 - 6kN/m ³)	97
Figura 63- Detalhe da ruptura do Ensaio 11 (PE7 - 7kN/m ³).....	98
Figura 64- Detalhe da ruptura do Ensaio 12 (PE7 - 7kN/m ³).....	99
Figura 65- Detalhe da ruptura do Ensaio 13 (PE7 - 7kN/m ³).....	99
Figura 66- Detalhe da ruptura do Ensaio 14 (PE7 - 7kN/m ³).....	99

Figura 67- Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento (PE7 - 7kN/m ³).....	100
Figura 68- Regressão entre Coesão e Tangente do Ângulo de Atrito (PE7 - 7kN/m ³)	102
Figura 69- Detalhe da ruptura do Ensaio 15 (PM0 - 0%).....	103
Figura 70- Detalhe da ruptura do Ensaio 16 (PM0 - 0%).....	104
Figura 71- Detalhe da ruptura do Ensaio 17 (PM0 - 0%).....	104
Figura 72- Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento (PM0 - 0%).....	105
Figura 73- Regressão entre Coesão e Tangente do Ângulo de Atrito (PM0 - 0%)	106
Figura 74- Detalhe da ruptura do Ensaio 18 (PM3 - 3%).....	107
Figura 75- Detalhe da ruptura do Ensaio 19 (PM3 - 3%).....	108
Figura 76- Detalhe da ruptura do Ensaio 20 (PM3 - 3%).....	108
Figura 77- Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento (PM3 - 3%).....	109
Figura 78- Regressão entre Coesão e Tangente do Ângulo de Atrito (PM3 - 3%)	110
Figura 79- Detalhe da ruptura do Ensaio 21 (PM6 - 6%).....	112
Figura 80- Detalhe da ruptura do Ensaio 22 (PM6 - 6%).....	112
Figura 81- Detalhe da ruptura do Ensaio 23 (PM6 - 6%).....	112
Figura 82- Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento (PM6 - 6%).....	113
Figura 83- Regressão entre Coesão e Tangente do Ângulo de Atrito (PM6 - 6%).....	114
Figura 84- Comparação entre as curvas tensão <i>versus</i> deslocamento obtidas por Ribeiro (2007)	116
Figura 85- Vista geral do equipamento com compressor de ar	117
Figura 86- Sistema de aplicação de carga	117
Figura 87- Detalhe da ruptura do Ensaio 24 - teste compressor de ar (PE4 - 4kN/m ³).....	118
Figura 88- Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento - compressor de ar (PE4 - 4kN/m ³).....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição dos RSU em diversas cidades.....	28
Tabela 2 – Peso específico de RSU	31
Tabela 3- Umidade dos componentes do RSU	35
Tabela 4- Coeficiente de permeabilidade para RSU	38
Tabela 5- Recalques em maciços sanitários	42
Tabela 6- Métodos para a determinação da resistência dos RSU.....	46
Tabela 7- Parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU	59
Tabela 8- Delineamento experimental.....	70
Tabela 9- Peso das amostras totais	70
Tabela 10- Composição gravimétrica do RSU de Viçosa	82
Tabela 11- Composição gravimétrica dos RSU de Viçosa (2007).....	84
Tabela 12 - Comprimentos L1 e L2 medidos (PE4 - 4kN/m ³).....	85
Tabela 13- Parâmetros de resistência obtidos para PE4 - 4kN/m ³	87
Tabela 14- Comprimentos L1 e L2 medidos (PE5 - 5kN/m ³).....	89
Tabela 15- Parâmetros de resistência obtidos para PE5 - 5kN/m ³	91
Tabela 16- Comprimentos L1 e L2 medidos (PE6 - 7kN/m ³).....	93
Tabela 17- Parâmetros de resistência obtidos para PE6 - 6kN/m ³	96
Tabela 18- Comprimentos L1 e L2 medidos (PE7 - 7kN/m ³).....	98
Tabela 19- Parâmetros de resistência obtidos para PE7 - 7kN/m ³	101
Tabela 20- Comprimentos L1 e L2 medidos (PM0 - 0%).....	103
Tabela 21- Parâmetros de resistência obtidos para PM0 - 0% de plástico mole	106
Tabela 22- Comprimentos L1 e L2 medidos (PM3 - 3%).....	107
Tabela 23- Parâmetros de resistência obtidos para PM3 - 3% de plástico mole	110
Tabela 24- Comprimentos L1 e L2 medidos (PM6 - 6%).....	111

Tabela 25- Parâmetros de resistência obtidos para PM6 - 6% de plástico mole.....	114
Tabela 26- Comprimentos L1 e L2 medidos - compressor de ar (PE4 - 4kN/m ³)	118
Tabela 27- Parâmetros de resistência obtidos para 4kN/m ³ com compressor de ar	119
Tabela 28 – Comparação dos resultados obtidos.....	121
Tabela 29- Comparação dos resultados obtidos	122

SUMÁRIO

1	Introdução	18
1.1	Contextualização	18
1.2	Objetivos.....	19
1.3	Organização do Trabalho.....	20
2	Revisão Bibliográfica	20
2.1	Resíduos Sólidos Urbanos	20
2.2	Formas de disposição do RSU	22
2.2.1	Lixão ou Vazadouros a céu aberto	23
2.2.2	Aterros Controlados.....	24
2.2.3	Aterro Sanitário	26
2.3	Propriedades físicas dos RSU	28
2.3.1	Composição gravimétrica	28
2.3.2	Peso específico	30
2.3.3	Composição granulométrica	33
2.3.4	Umidade	34
2.3.5	Permeabilidade	37
2.3.6	Temperatura.....	40
2.4	Propriedades Mecânicas dos RSU	41
2.4.1	Compressibilidade	41
2.4.2	Resistência ao Cisalhamento	44
2.5	Parâmetros de Resistência de RSU.....	53
3	Material e Métodos.....	62
3.1	Material.....	63
3.2	Descrição do Equipamento de ensaio.....	65
3.4	Delineamento experimental.....	69
3.4	Procedimentos metodológicos	70

3.3.1 Caracterização dos Resíduos	70
3.3.2 Determinação da umidade da amostra.....	75
3.3.3 Procedimentos utilizados nos ensaios	75
3.4 Cálculo dos parâmetros de resistência.....	79
4 Resultados e discussões	81
4.1 Características das amostras ensaiadas.....	81
4.2 Ensaio de estabilidade de talude	84
4.2.1 Variação da compactação dos RSU.....	85
4.2.1.1 Ensaio com peso específico igual a 4kN/m ³	85
4.2.1.2 Ensaio com peso específico igual a 5kN/m ³	89
4.2.1.3 Ensaio com peso específico igual a 6kN/m ³	93
4.2.1.4 Ensaio com peso específico igual a 7kN/m ³	98
4.2.2 Variação do teor de plásticos moles	103
4.2.2.1 Ensaio com 0% de plásticos moles.....	103
4.2.2.2 Ensaio com 3% de plásticos moles.....	107
4.2.2.3 Ensaio com 6% de plásticos moles.....	111
4.2.3 Ensaio usando compressor de ar.....	115
4.3 Comparação dos resultados	120
5 Conclusões.....	128
5.1 Sugestões	130
Referências	132

1 Introdução

1.1 Contextualização

Nas últimas décadas, os fenômenos do crescimento populacional e da urbanização somadas ao processo de industrialização, revolução tecnológica e aumento do poder de compra da população, têm refletido de forma intensa no aumento das taxas de geração de resíduos. Dessa forma, os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) passam a ser um problema de grande dimensão que afeta a sociedade e o poder público.

No Brasil, as formas mais comuns de disposição do lixo são os aterros sanitários, os aterros controlados e os lixões (ou vazadouros a céu aberto), embora o uso de aterros controlados e lixões não serem considerados uma forma adequada de disposição. Apesar de estudos apontem outras técnicas de tratamento para os RSU, como por exemplo: compostagem, incineração e reciclagem, estes tratamentos não fazem parte da realidade do país, devido aos custos de operação e manutenção que exigem (NASCIMENTO, 2007).

Ao contrário dos aterros controlados e dos lixões, o aterro sanitário é uma forma de disposição ambientalmente adequada, uma vez que minimiza os impactos ambientais, os danos ou riscos à saúde pública e a segurança, por meio de da aplicação de técnicas de engenharia, no qual o projeto executivo contempla etapas como: impermeabilização de base, drenagem do percolato e gases, drenagem de águas pluviais, cobertura final e tratamento do biogás e do percolato coletado (OLIVEIRA, 2017).

No ano de 2010 passou a vigorar no Brasil a lei 12.305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, atribuindo que os lixões deveriam ser encerrados até 2014, dando lugar a uma forma ambientalmente adequada de disposição, o aterro sanitário, gerando, a partir desse momento, uma preocupação maior com a forma de disposição dos resíduos.

Entretanto, segundo a norma NBR 13896 da ABNT (2010) - Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação, existem restrições na escolha do terreno que irá receber o aterro sanitário, devendo ser levado em consideração características tais como a distância do centro populacional mais próximo, distância de cursos d'água,

profundidade do lençol freático, área que atenda à vida útil desejada, etc. Desta forma, a existência de terrenos que atendam às exigências da norma é limitada.

Então, com a escassez de áreas adequadas à disposição de resíduos cria-se a necessidade de aumento da capacidade volumétrica de aterros sanitários em operação, ou de reutilização de antigas áreas de disposição encerradas. Com isso, tem-se construído aterros cada vez mais altos, reduzindo o problema da demanda de resíduos e, por outro lado, gerando preocupações quanto à estabilidade destes maciços (REMÉDIO, 2014).

Esse aumento na verticalização tem como consequência um crescimento no número de acidentes geotécnicos, que podem ocorrer por diversos motivos, entre eles: projetos inadequados, problemas construtivos e operacionais, ausência ou ineficiência de sistemas de drenagem de líquidos e gases e inexistência de programas de monitoramento ambiental e geotécnico (BATISTA, 2010).

Os projetos para construção de aterros sanitários no Brasil são feitos, em sua maioria, utilizando parâmetros e critérios baseados na literatura internacional, devido à escassez de estudos nessa área no país. A estabilidade dos taludes deve ser assegurada e o recalque que ocorre no maciço deve ser previsto e, para isso, é necessário conhecer os parâmetros de resistência do material depositado. No caso dos RSU, esses parâmetros variam de acordo com a composição gravimétrica, compactação e distribuição do tamanho das partículas, visto que trata-se de um material heterogêneo (OLIVEIRA, 2002).

Dentro desse contexto, torna-se importante o estudo dos RSU no que diz respeito aos valores de parâmetros de resistência para que se possam fazer análises geotécnicas de estabilidade de taludes e de recalque dos maciços.

1.2 Objetivos

Em vista do exposto anterior, o objetivo desse trabalho foi avaliar os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) dos resíduos sólidos urbanos coletados na cidade de Viçosa-MG, por meio de ensaios de estabilidade de talude. Foi estudado a relação que a compactação e o aumento peso específico dos resíduos têm com os parâmetros de resistência e o efeito de reforço causado pela presença de plásticos moles nos RSU.

Dessa forma considera-se que essa pesquisa poderá contribuir positivamente na compreensão das características dos resíduos, promovendo alternativas para aumentar a vida útil do aterro, evitando a disposição inadequada dos resíduos e preservando a qualidade dos recursos naturais.

1.3 Organização do Trabalho

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos.

No capítulo 1 fez-se uma introdução procurando apresentar a relevância do problema de disposição final dos resíduos no Brasil, bem como a importância do estudo dos parâmetros de resistência para os projetos de aterros sanitários. Nesse capítulo são apresentados, também, os principais objetivos dessa pesquisa.

O capítulo 2 trata de uma revisão bibliográfica referente ao panorama brasileiro na temática disposição de resíduos, sendo apresentadas as principais formas utilizadas no Brasil. Também são apresentados nesse capítulo as propriedades físicas e mecânicas dos RSU e os seus parâmetros de resistência.

O capítulo 3 apresenta os materiais e a metodologia utilizada no trabalho. Nesse é apresentado o equipamento utilizado, como foi realizada a coleta e os procedimento para a caracterização do resíduo e obtenção da umidade, as metodologias utilizadas nos ensaios de talude e o cálculo dos parâmetros de resistência.

No capítulo 4 são apresentadas os resultados obtidos nos ensaios, comparações e discussões.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e conclusões, além de sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Os RSU são materiais gerados pela ação humana, sendo descartados após sua utilização quando considerados sem utilidade, como restos de alimentos, embalagens em geral, itens

obsoletos, quebrados, entre outros (BORGATTO, 2010), representando uma das principais preocupações ambientais atualmente. Locais que apresentam gestão e gerenciamento ruins de tal atividade podem sofrer com poluição do ar e das águas, superficiais e/ou subterrâneas, proliferação de doenças e odores desagradáveis.

A norma NBR 10004 da ABNT (2004, p.1) - Resíduos Sólidos - Classificação, define resíduos sólidos como sendo:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Ainda segundo a norma NBR 10004 da ABNT (2004), a classificação dos resíduos pode ser feita de acordo com os riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. As classes definidas são:

- Resíduos Classe I – Perigosos: apresentam periculosidade ou características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade;
- Resíduos Classe II - Não Perigosos: divididos em duas subclasses:
 - Classe II A - Não Inertes: podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade e/ou solubilidade em água; e
 - Classe II B - Inertes: quando submetidos a um contato estático ou dinâmico com água, não apresentam nenhum de seus componentes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água definidos pelo Anexo G da referida Norma.

O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2020) indica que a geração de RSU é de 79 milhões de toneladas anuais no país, com média de produção de resíduo por habitante em torno de 1,04 Kg/hab/dia. Ainda segundo o Panorama, do total de resíduos gerados, 72,7 milhões de toneladas são coletados, resultando em um índice de cobertura de coleta de 92% para o país, representando 6,3 milhões de toneladas de resíduos não coletados.

As estimativas de resíduos coletados no Brasil por regiões são apresentadas conforme a Figura 1. Segundos o Diagnóstico de Manejo de RSU elaborado pelo Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS), 65,1 milhões de toneladas de resíduos foram coletados em 2019, a média de produção de resíduos por habitante foi de 0,99 Kg/hab/dia e a maior participação na produção dos resíduos foi da região Sudeste (43,4%), seguida pelo Nordeste (28,5%), Sul (12,2%), Centro-Oeste (8,5%) e Norte (7,4). Ainda, a taxa de cobertura do serviço de coleta dos municípios participantes do SNIS em relação à população total é de 92,1% para o país.

Figura 1- Estimativa de massa coletada no país segundo macrorregião geográfica

Macrorregião geográfica	Quant. de municípios no Brasil	População urbana	Indicador médio (IN021) (kg/hab./dia)	Quantidade de (RDO+RPU) em função da pop. urb. (milhões de ton./ano)	Participação relativa (%)
Norte	450	13.606.102	0,97	4,82	7,4
Nordeste	1.794	41.971.407	1,21	18,54	28,5
Sudeste	1.668	82.276.710	0,94	28,23	43,4
Sul	1.191	25.642.279	0,85	7,96	12,2
Centro-Oeste	467	14.515.251	1,05	5,56	8,5
Total - 2019	5.570	178.011.749	0,99	65,11*	100,0
Total - 2018	5.570	176.539.719	0,96	62,78	100,0
Total - 2017	5.570	175.588.503	0,95	61,91	100,0

Nota: *Por se entender mais pertinente, a quantidade coletada total foi estimada em função do somatório das parcelas estratificadas.

Fonte: BRASIL (2019)

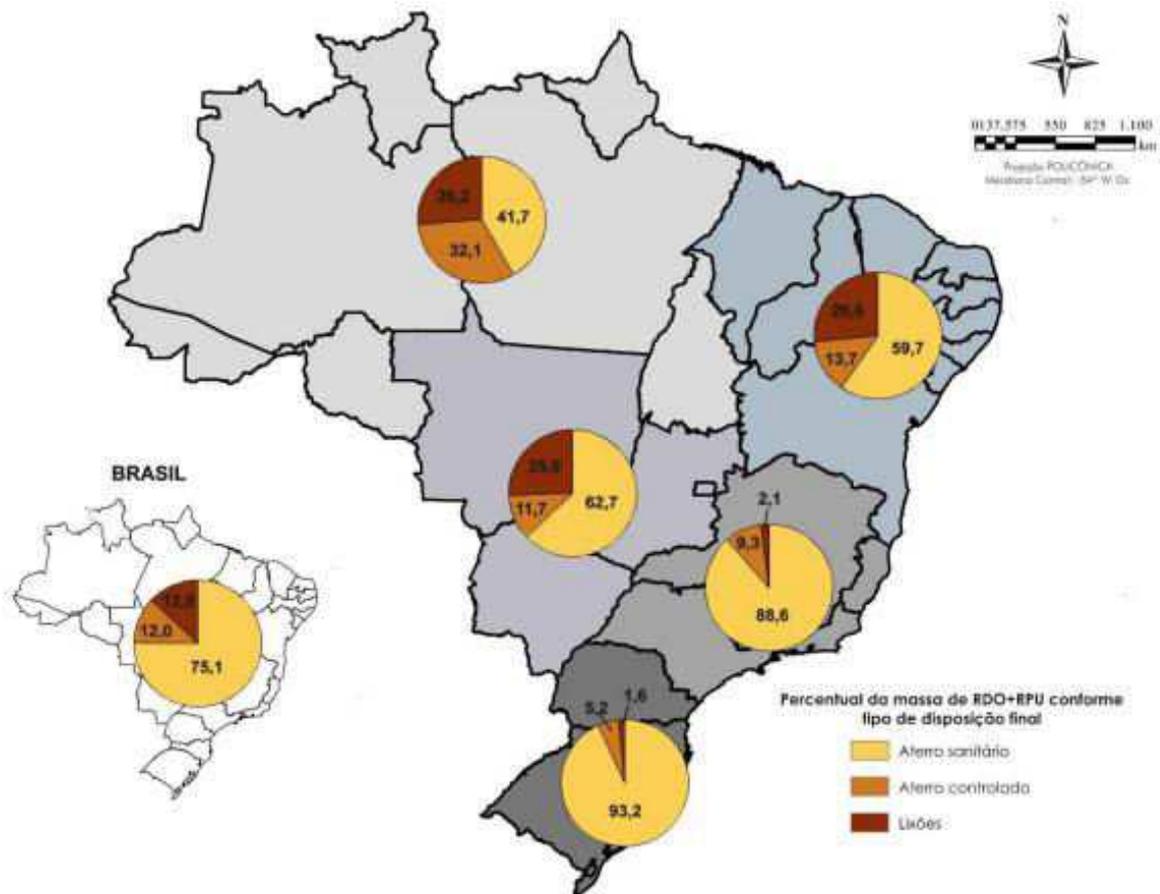
2.2 Formas de disposição do RSU

Segundo Teixeira (2015), a disposição de resíduos sólidos faz parte de um contexto mais amplo, o Gerenciamento de Resíduos Sólidos, no qual a disposição é o fim do ciclo que busca de forma sequencial: minimização da geração dos resíduos; reciclagem; coleta e transporte;

redução volumétrica e atenuação de características adversas dos resíduos; disposição final em aterros.

No Brasil, cerca de 48,9 milhões de toneladas dos RSU têm como destino final os aterros sanitários, o que representa 75,1% do total coletado. Formas de disposição inadequada continuam sendo usadas para destinar mais de 16,2 milhões de toneladas de resíduos, correspondentes a 24,9 do coletado. Desse montante, 12,9% são enviados para lixões e 12% aterros controlados (SNIS, 2019). A disposição final de RSU nas regiões brasileiras pode ser observada na Figura 2.

Figura 2- Disposição final de RSU nas regiões (%)



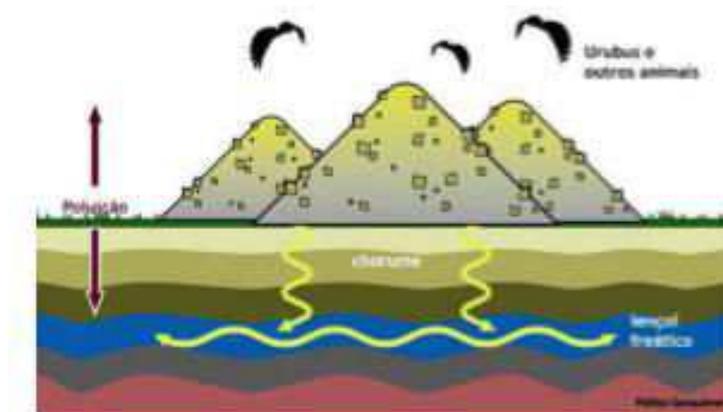
Fonte: BRASIL (2019)

2.2.1 Lixão ou Vazadouros a céu aberto

É uma forma de disposição final inadequada, na qual os resíduos são descarregados sobre o solo, sem que haja medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Desta forma,

ocorre a proliferação de vetores e a presença de odores desagradáveis, além da contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais, por meio de da penetração do chorume, como pode ser visto na Figura 3 (NASCIMENTO, 2007).

Figura 3- Ilustração do esquema de funcionamento de um lixão ou vazadouro



Fonte: Hypeverde (2019)

Nos lixões (ou vazadouros) não há nenhum tipo de fiscalização sobre tipo, volume e classe dos resíduos depositados. Resíduos domiciliares e comerciais, que são pouco perigosos, são depositados junto com os industriais e hospitalares, que possuem alto grau de periculosidade e são extremamente poluidores. Além disso, há a existência de riscos de incêndios, provocados pelos gases que são liberados durante o processo de degradação do lixo, e de escorregamentos, uma vez que os resíduos são sobrepostos sem qualquer critério de projeto, o que leva a formação de montantes altos e muito inclinados (OLIVEIRA, 2017).

2.2.2 Aterros Controlados

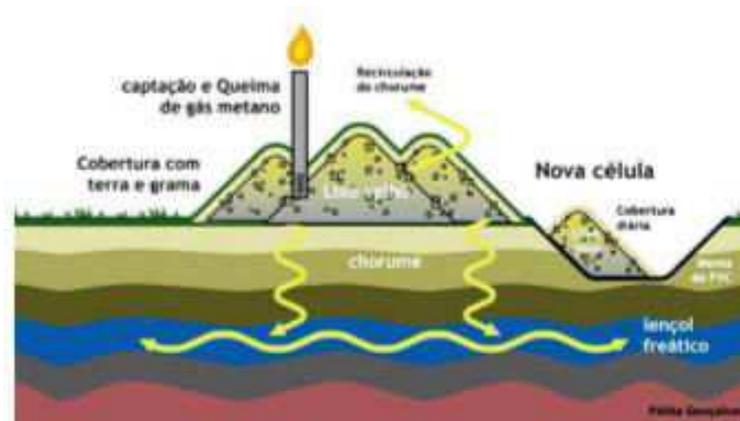
O Plano Nacional de Resíduos Sólidos não considera a disposição em aterros controlados como uma forma adequada de deposição final de resíduos e apesar de a norma NBR 8849 - Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos, da ABNT (1985), ter sido cancelada, essa forma de disposição ainda é praticada por alguns municípios.

Essa forma de disposição de RSU no solo utiliza alguns princípios de engenharia para confinar os resíduos. Segundo Oliveira (2002):

A diferença deste tipo de disposição para o anterior consiste basicamente na existência de um controle mínimo como: o da entrada dos resíduos, de pessoas e animais, na compactação dos resíduos e a existência de uma cobertura de solo para o controle e minimização da proliferação de vetores. Não estão presentes todos os elementos de engenharia que permitam o confinamento seguro dos resíduos, especialmente os relacionados com sistemas de impermeabilização e destinação do chorume.

No caso dos aterros controlados, é comum encontrar células construídas em áreas adjacentes a um lixão remediado que contam com adequados sistemas de impermeabilização e de drenagem de lixiviado e gás, como pode ser observado na Figura 4. Dessa forma, o impacto ambiental gerado pela disposição de lixo é minimizado (OLIVEIRA, 2017).

Figura 4- Ilustração do esquema de funcionamento de um aterro controlado



Fonte: Hypeverde (2019)

Almeida (2011) destaca que os aterros controlados tratam-se de uma técnica de disposição que possui qualidade bastante inferior em comparação aos aterros sanitários, uma vez que, apesar de haver um maior controle do que nos lixões, esse método gera problemas ambientais, estando este fator relacionado ao baixo custo de implantação do sistema.

Apesar de não ser considerado como forma adequada de deposição final de resíduos, Almeida (2017) ressalta que em muitos casos o aterro controlado é a única alternativa viável, devido à falta de recursos dos municípios. Isso é válido principalmente para as pequenas cidades que não possuem equipamentos ou arrecadação suficiente para contratação de empresas especializadas na implantação e operação de aterros sanitários.

2.2.3 Aterro Sanitário

A norma NBR 8419 da ABNT (1996, p. 1) define aterros sanitários para disposição de resíduos sólidos urbanos como:

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

De acordo com Leite (1995 apud BORGATTO, 2006), o fato de o aterro sanitário ser o método de disposição de resíduos mais comum no mundo é justificado por ser uma solução mais acessível economicamente, se comparada com outros métodos de tratamento, como a incineração ou a compostagem.

Os aterros sanitários são considerados obras de engenharia, no qual os resíduos são depositados e aterrados no solo, de acordo com suas características peculiares, dispendo-se de técnicas e medidas para que o impacto ambiental gerado seja o menor possível (NASCIMENTO, 2007).

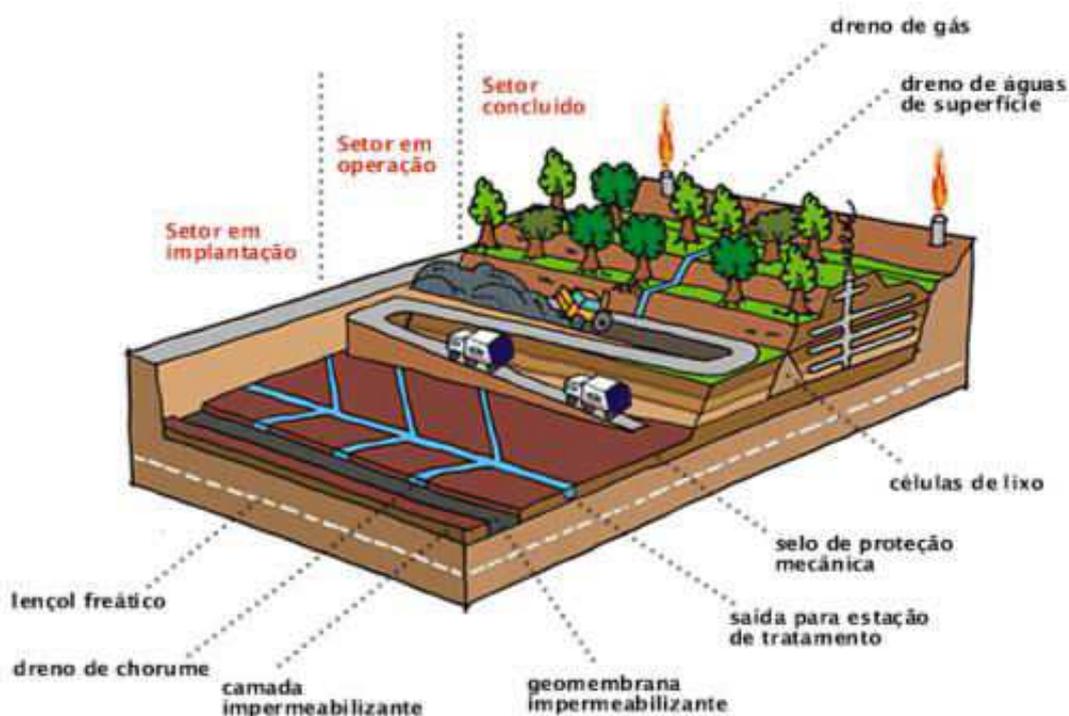
Para que de fato os aterros sanitários de RSU não causem danos ou riscos à saúde pública e à segurança, e para que os impactos ambientais sejam os menores possíveis, esse tipo de obra compreende componentes e técnicas de operação específicos, como: divisão em células, sistema de impermeabilização do solo de base e laterais, sistema de drenagem e coleta de líquidos percolados e biogás, sistema de drenagem de águas pluviais, sistema de tratamento de

chorume, compactação de resíduos, cobertura diária e final, monitoramento geotécnico e ambiental, entre outros. Dessa forma, existe um controle rigoroso sobre o tipo, volume e classe dos resíduos depositados.

Neste tipo de operação, o resíduo é disposto por cima de um revestimento de fundo, seguindo normas específicas. Esses resíduos também recebem camadas de cobertura, e existe sistema de captação de efluentes e gases gerados pela decomposição do mesmo, que levam esses produtos a sistemas próprios de tratamento. O chorume, efluente gerado, é devidamente tratado, e o biogás, emissão gasosa composta principalmente de metano e dióxido de carbono, pode ser recuperado ou tratado antes do descarte ao meio ambiente (COSTA, 2013 apud OLIVEIRA, 2017).

Na Figura 5, está representada de forma esquemática a seção transversal de um aterro sanitário na qual pode-se observar setores em diferentes estágios de execução e os elementos que constituem esta obra.

Figura 5- Representação esquemática da seção transversal de um aterro sanitário



Fonte: Toda matéria (2019)

2.3 Propriedades físicas dos RSU

As principais propriedades físicas dos RSU incluem o peso específico, umidade, composição física ou gravimétrica, composição granulométrica ou tamanho das partículas, temperatura e permeabilidade, as quais serão comentadas a seguir.

2.3.1 Composição gravimétrica

A composição gravimétrica traduz o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra de resíduo analisada. Os componentes mais utilizados na determinação da composição gravimétrica dos RSU: matéria orgânica, metal ferroso, metal não ferroso, borracha, alumínio, madeira, papelão/papel, couro, plástico rígido, plástico maleável, vidro, pano/trapos, ossos, cerâmica e agregado fino.

A composição dos RSU é muito heterogênea, apresentando variação da porcentagem de materiais constituintes de acordo com a região de onde o resíduo é proveniente. Isso ocorre principalmente devido à diferentes hábitos populacionais, nível educacional, atividade econômica predominante e nível de desenvolvimento econômico (BOSCOV, 2008).

Na tabela 1, é possível observar que a quantidade de matéria orgânica presente nos RSU é menor nos países desenvolvidos do que nos países subdesenvolvidos.

Tabela 1- Composição dos RSU em diversas cidades

Local	Metal (%)	Papel (%)	Plástico (%)	Borracha, couro e madeira (%)	Têxteis (%)	Material Orgânico (%)	Vidro (%)	Outros (%)	Fonte
Bangkok (Tailândia)	1,0	25,0	-	7,0	3,0	44,0	1,0	19,0	Manassero et al. (1997)
Pekin (China)	1,0	5,0	1,0	1,0	-	45,0	1,0	46,0	Manassero et al. (1997)
Nairobi (Kenia)	3,0	12,0	5,0	-	-	74,0	4,0	2,0	Manassero et al. (1997)
Hong Kong (Japão)	3,0	3,0	-	7,0	10,0	15,0	10,0	22,0	Manassero et al. (1997)
New York (EUA)	5,0	22,0	-	3,0	-	20,0	6,0	46,0	Manassero et al. (1997)
Istanbul (Turquia)	2,0	10,0	3,0	6,0	3,0	61,0	1,0	14,0	Manassero et al.

									(1997)
Atenas (Grécia)	4,0	19,0	7,0	4,0	-	59,0	2,0	5,0	Manassero et al. (1997)
Cochabamba (Bolívia)	1,0	2,0	3,0	1,0	-	71,0	1,0	21,0	Manassero et al. (1997)
Belo Horizonte (Brasil)	2,3	9,5	10,9	4,0		61,6	2,9	8,8	SMLU (2003)
Viçosa (Brasil)	1,6	14,2	8,5	1,3	2,2	65,1	1,1	6,1	UFV (1999)
Rio de Janeiro (Brasil)	1,7	16,1	20,3	0,8	1,8	53,6	2,8	2,9	Comlurb (2009)
São Paulo (Brasil)	2,0	13,0	16,0	-	-	58	11*		Limpurb (2003)
Maceió (Brasil)	3	16	13	-	-	50	18*		UFA (2004)

*Valores incluem madeira/couro/vidro/borracha e outros

Fonte: Suzuki (2012)

O percentual de matéria orgânica dos RSU brasileiros varia entre 50 e 60%, típicos de países em desenvolvimento, conforme pode ser observado na Tabela 1. Este teor orgânico elevado propicia, entre outros fatores, uma elevada umidade ao resíduo.

Conhecer a composição física permite uma avaliação preliminar da degradabilidade, do poder de contaminação e das possibilidades de reutilização, reciclagem e valorização energética e orgânica dos RSU. Além disso, o conhecimento dos elementos que compõem a massa de resíduos e o percentual de cada material é de particular importância visto que este condiciona o comportamento global do aterro (BORGATTO, 2006).

Assim como os solos, os RSU são considerados materiais multifásicos constituídos por fase sólida, líquida e gasosa. Existe uma variação do percentual das fases com o tempo devido aos processos de biodegradação que estão relacionados com a umidade, o conteúdo orgânico do RSU e as condições climáticas. A fase sólida é composta de diversos materiais, os quais formam um arranjo poroso, com vazios interpartículas e intrapartículas, que podem ou não estar preenchidos por líquido percolado e/ou biogás e ainda podem estar em processo de decomposição. Dessa forma, verifica-se que para compreender o comportamento dos maciços de RSU, o conhecimento das interações existentes entre as três fases e as alterações destas com o tempo passa a ser importante (CARVALHO, 1999).

Para Borgatto (2006), a composição gravimétrica dos RSU, em relação aos percentuais de matéria orgânica e de plásticos/têxteis, tem relação direta com a resistência ao cisalhamento dos resíduos. Os plásticos e têxteis que constituem os principais componentes fibrosos do lixo, conferem a estes valores de pseudo coesão muitas vezes elevados. Já o percentual de matéria orgânica está diretamente vinculado à umidade, à permeabilidade e ao peso específico da massa de resíduo. Valores de umidade mais elevados remetem a coeficientes de permeabilidade e pesos específicos mais baixos que são parâmetros de grande importância em projetos e operações de aterros sanitários.

A composição gravimétrica dos RSU é obtida por meio de processo de amostragem para a seleção e mensuração dos componentes, determinando-se a relação entre o peso de cada componente presente na amostra e o peso total da amostra.

2.3.2 Peso específico

O peso específico representa a relação entre o peso e o volume ocupado pela massa de resíduos. O seu valor pode variar de acordo com a umidade e a composição física e granulométrica do RSU, o volume da camada de cobertura diária, o grau de compactação durante a deposição (método executivo do aterro), o peso das camadas sobrepostas, a decomposição e o adensamento com o tempo.

Em relação à composição gravimétrica, o peso específico varia sendo que quanto maior for a quantidade de componentes leves (papel, papelão, plásticos, etc) ou quanto menor for a quantidade de matéria orgânica, menor será seu valor. Observa-se que em áreas de maior poder aquisitivo, com maior consumo de materiais supérfluos, o peso específico dos RSU é menor quando comparado a áreas de menor poder aquisitivo, com maior descarte de matéria orgânica (MARTINS, 2006).

O grau de compactação é um dos principais fatores que influenciam no valor do peso específico. São encontrados valores que podem variar de 3,0 a 7,0 kN/m³ para resíduos não compactados e de 9,0 a 13,0 kN/m³ quando aplicada uma compactação controlada utilizando-se tratores de esteira apropriados (BORGATTO, 2010).

Na Tabela 2 são apresentados valores médios para o peso específico de resíduos sólidos urbanos determinados por diversos autores, incluindo valores de resíduos brasileiros.

Tabela 2 – Peso específico de RSU

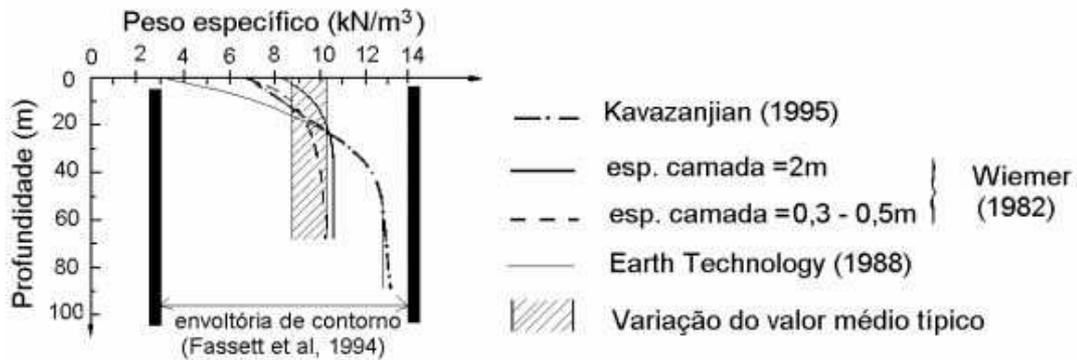
Autor	Peso Específico (kN/m ³)	Característica do RSU
Schomaker (1972)	2,9	Não compactado
	4,7 a 5,9	Medianamente compactado
	8,8	Bem compactado
Sargunan et al. (1986)	5,5 a 6,9	Pouco compactado
Landva e Clark (1986)	6,8 a 16,2	Bem compactado
Watts e Charles (1990)	5,4 a 8	Bem compactado
Oweis e Khera (1990)	6,3 a 9,4	Compactado
Richardson e Reynolds (1991)	15	Não relatado
Fasset et al. (1994)	3 a 9	Mal compactado
	5 a 8	Medianamente compactado
	9 a 10,5	Bem compactado
Zonrberg et al. (1999)	10 a 15	Não relatado
Silveira (2004)	13,4 a 16,5	Não relatado
	9,5 a 16,4	Não compactado
	16,8 a 19,7	Compactado
	9,1 a 10,9	Compactado
	10 a 10,9	Compactado
Benvenuto e Cunha (1991)	10	Condição drenada
	13	Condição saturada
Santos e Presa (1995)	7	Recém lançados
	10	Após recalque
Kaimoto e Cepollina (1996)	5 a 7	RSU novo e pouco compactado
	9 a 13	Após compactação e recalques
Mahler e Oturri (1998)	10,5	Seção com 10 meses de alteamento
Abreu (2000)	1,5 a 3,5	Solto
	3,5 a 6,5	Medianamente densos
	6,5 a 14	Denso

Fonte: Suzuki (2012)

Outro aspecto que interfere no peso específico, diz respeito às pressões do material subjacente, que estão diretamente ligadas com a profundidade. Quanto maior a profundidade, maiores serão as pressões subjacentes, promovendo um maior adensamento e compressão do maciço. Kavazanjian et al. (1995 apud CARVALHO 1999) propuseram um

perfil de peso específico variando com a profundidade. Eles mostraram que o peso específico pode variar de valores de 6 kN/m³ na superfície até cerca de 10 kN/m³ em profundidades próximas de 40 m, a partir da qual tendem a se estabilizar, conforme pode ser observado na Figura 6.

Figura 6- Variação do peso específico com a profundidade



Fonte: Kavazanjian et al. (1995 apud CARVALHO, 1999)

A idade também exerce um efeito direto nos valores de peso específico do RSU. Ao longo do tempo, a degradação dos componentes orgânicos resultará em perda de massa, mudanças no tamanho e conseqüentemente na densidade do RSU, além da alteração das propriedades mecânicas (compressibilidade e resistência ao cisalhamento). Geralmente espera-se que a degradação gere um aumento na densidade do resíduo (Dixon e Jones, 2005). Desta forma, é de se esperar que o resíduo velho apresente peso específico superior ao resíduo novo.

Não existe um método padronizado para a determinação do peso específico *in situ*. Dentre os diversos métodos utilizados, destaca-se o método da escavação de poço ou trincheira. Esse ensaio consiste na pesagem de material e determinação do volume a partir do preenchimento da cava, que normalmente é devidamente impermeabilizada e preenchida com água. O peso específico do RSU depositado pode ser determinado a partir da relação da massa do material escavado e do volume da cava. Entretanto, esta técnica tem como desvantagens a limitação de profundidade, em torno de 4 m, além da impossibilidade de separar possíveis camadas de coberturas pertencentes à trincheira de ensaio, impossibilitando, desta forma, a obtenção de resultados em profundidades maiores (GACHET et al. 1998 apud MARTINS, 2006). Além disso, durante a determinação do volume da cava podem ocorrer problemas como: o alívio de tensões provocado pela retirada de material, que provoca movimentos laterais e de fundo em direção a abertura; movimentos de equipamentos pesados e pessoas na borda da cava, que também contribuem para a diminuição da mesma; dificuldades na preparação da cava, tendo

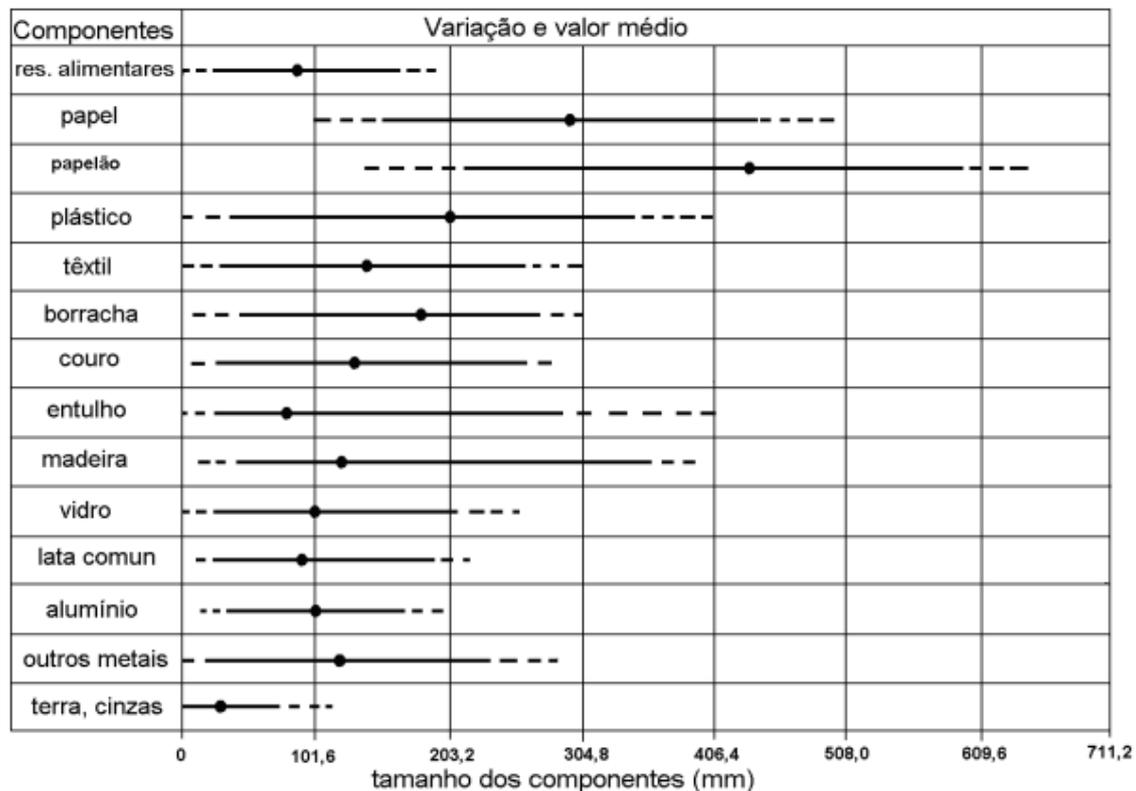
em vista a heterogeneidade dos resíduos e suas dimensões; dificuldade na colocação da manta plástica e sua adaptação à cava de forma a realmente ocupar as superfícies de todo o volume de resíduos escavado; dentre outros (SUZUKI, 2012).

2.3.3 Composição granulométrica

A determinação da dimensão e distribuição das partículas do RSU é bastante limitada, devido a grande heterogeneidade e variação desses resíduos, não existindo um método padronizado para tal análise.

Para uma primeira aproximação, tem-se procurado correlacionar os componentes individuais do resíduo com diâmetros equivalentes, definidos no estudo de Tchonobanoglous et al. (1993 apud CARVALHO, 1999), como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7- Diâmetros equivalentes dos componentes do RSU



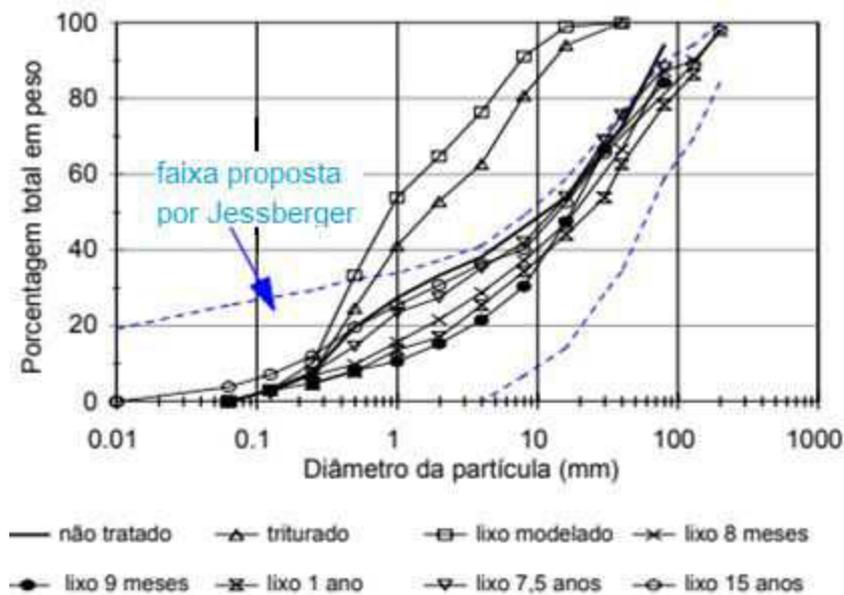
Fonte: Tchonobanoglous et al. (1993 apud CARVALHO, 1999)

Outra forma de realizar a análise da distribuição do tamanho das partículas é utilizando-se a análise granulométrica clássica da mecânica dos solos. Assim, a composição granulométrica

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

A Figura 8 mostra as curvas do tamanho das partículas para resíduos, com diferentes idades variando de 8 meses a 15 anos (MANASSERO et al., 1996 apud CARVALHO 1999). Pode-se notar que o percentual de materiais com granulação mais fina tende a aumentar com os anos, resultado da biodegradação do material orgânico. A Figura mostra também a faixa de variação típica dos RSU proposta por Jessberger (1994 apud CARVALHO, 1999).

Figura 8- Distribuição granulométrica de RSU para diferentes idades



Fonte: modificado de Carvalho (1999)

2.3.4 Umidade

A umidade ou teor de água representa a quantidade de água presente nos resíduos, podendo ser determinada por meio de da secagem de amostras representativas em estufas ou usando outros métodos, como a sonda de nêutrons, por exemplo. Cabe ressaltar que não existe uma normatização específica para o ensaio da determinação da umidade de amostras de RSU.

Ao utilizar o método para obtenção da umidade dos RSU por meio de do uso de secagem de amostras em estufa, a umidade pode ser expressa tanto em base seca (Equação 1), como é

feita na geotecnia, quanto em base úmida (Equação 2), sendo importante especificar o tipo de umidade que se está utilizando. Nesse método, a temperatura da estufa não deve ser superior a 70°C para evitar a queima de matéria orgânica (BORGATTO, 2010).

$$w_s = \frac{M_w}{M_s} 100(\%) \quad \text{Equação 1}$$

$$w_w = \frac{w_s}{1+w_s} 100 (\%) \quad \text{Equação 2}$$

Onde,

w_s - umidade base seca

w_w - umidade base úmida

M_w - massa de água

M_s - massa seca

A Tabela 3 mostra os valores de umidade encontrados por Carvalho (1999) para diversos componentes do RSU.

Tabela 3- Umidade dos componentes do RSU

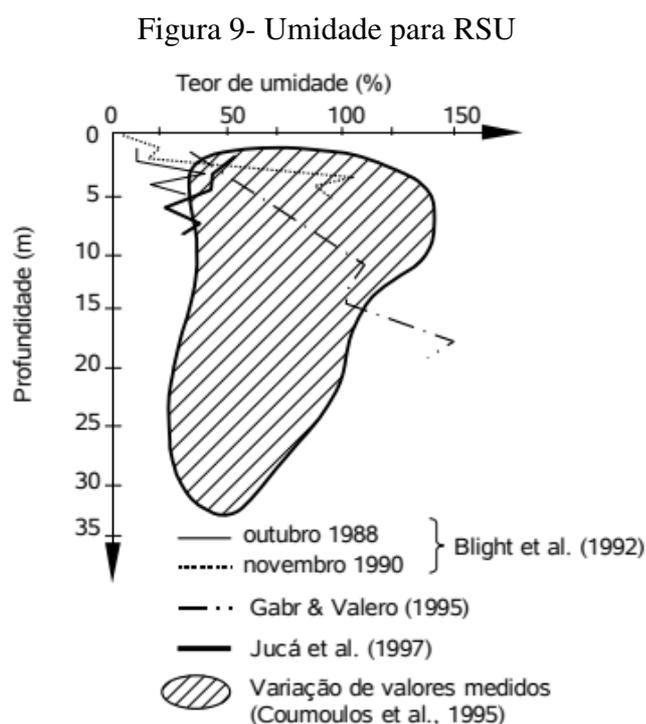
Componentes	Umidade (%)	
	Base seca	Base úmida
Metais	19,6	16,4
Papel	74,8	42,8
Vidro	5,9	5,57
Plástico	41,5	29,3
Borracha	24,5	19,6
Têxteis	55,0	35,5
Pedra	12,6	11,2
Madeira	69,8	41,1
Pasta Orgânica	47,0	32,0

Fonte: Carvalho (1999)

A umidade do RSU depende de vários fatores como sua composição granulométrica inicial, composição gravimétrica, condições climáticas, procedimentos operacionais, a taxa de decomposição biológica e a eficiência do sistema de drenagem de chorume e do sistema de cobertura (BORGATTO, 2010).

Segundo Knochenmus et al. (1998 apud SUZUKI, 2012), a umidade dos resíduos é, inicialmente, resultado de altas porcentagens do lixo orgânico (resíduos alimentares, de jardim e de poda), já que componentes inorgânicos (como plástico e papel) geralmente tem a umidade abaixo de 10%. Assim, a umidade tende a aumentar com o aumento do conteúdo de orgânicos presentes no RSU.

Em relação as condições climáticas, devem ser destacados os índices de precipitação e de evapotranspiração. Blight et al. (1992 apud CARVALHO, 1999) ao realizarem ensaios para determinação da umidade no aterro de Linbro em Johannesburg, na África do Sul, constataram uma grande variação desta propriedade em diferentes épocas do ano. Em outubro/88, obtiveram valores de 50% e, em novembro/90, após altos índices de precipitação, valores próximos de 100%, como pode ser observado na Figura 9.



Fonte: Carvalho (1999)

A variação do teor de água em relação à profundidade não é conclusiva, como pode ser observado na Figura 9. Gabr & Valero (1995 apud CARVALHO, 1999) mostraram um aumento da umidade com o aumento da profundidade, variando de 30% em locais próximos da superfície até 130% para maiores profundidades. Um comportamento contrário foi

encontrado por Coumoulos et al. (1995 apud CARVALHO, 1999). Os autores observaram teores de umidade em torno de 80% para a profundidade de 5 metros e 40% para 30 metros. Jucá et al. (1997 apud CARVALHO, 1999) também notaram uma diminuição do teor de água com o aumento da profundidade.

A infiltração de água de chuva também é um fator que influencia a umidade dentro do aterro, principalmente em regiões de alta pluviosidade e durante a fase de operação do aterro. Desta forma, os sistemas de drenagem de águas superficiais, de cobertura final e de drenagem de chorume têm grande influência na umidade de um maciço de RSU. O primeiro permite as águas pluviais sejam retiradas do local de operação do aterro sanitário, o segundo dificulta a penetração das águas pluviais para o interior da massa de resíduos e o terceiro realiza a drenagem dos líquidos percolados para fora do maciço. Sendo assim, ambos os sistemas têm grande importância na estabilidade de um aterro sanitário, pois possibilitam a redução do desenvolvimento de poro-pressões e, conseqüentemente, no aumento da resistência do maciço de RSU.

2.3.5 Permeabilidade

A permeabilidade representa o tempo necessário para que um líquido percorra os vazios de uma massa de solo ou de resíduos. É a característica que um meio poroso tem em permitir que líquidos fluam entre suas partículas com maior ou menor velocidade.

O coeficiente de permeabilidade (k) pode ser obtido por meio de ensaios de laboratório e ensaios *in situ*, executados em trincheiras e poços escavados de grande diâmetro ou em furos de sondagem.

A permeabilidade dos resíduos é um importante parâmetro na avaliação da quantidade de líquidos lixiviados gerados e no dimensionamento dos sistemas de drenagem interna de um aterro sanitário. Além disso, ela condiciona a circulação de líquidos e gases dentro da massa de resíduos. Quanto menor a permeabilidade final da massa de resíduos, menores serão a circulação e liberação de líquidos produzidos (Oliveira, 2002).

Esse coeficiente é altamente dependente do procedimento de aterramento, grau de compactação, pressão de sobrecarga, idade e composição do resíduo (KNOCHENMUS et al. 1998, apud CARVALHO, 1999). Dessa forma, é importante que a permeabilidade seja determinada em cada caso.

A disposição dos resíduos em camadas e o uso de solo de cobertura diária resultam em maciços de resíduos constituídos por uma estrutura de camadas sub-horizontais e com a presença de partículas finas (papéis e plásticos) orientadas horizontalmente, resultando em propriedades hidráulicas anisotrópicas, com permeabilidade maior na direção horizontal (DIXON E JONES, 2005).

A faixa de valores típicos de coeficiente de permeabilidade apresentados na literatura está compreendida entre 10^{-8} e 10^{-4} m/s. Esta grande variação se deve às diferentes metodologias empregadas nos ensaios e aos diferentes pesos específicos dos resíduos oriundos de diversos locais de disposição final. Entretanto, apesar desta extensa faixa de valores, a grande maioria deles concentra-se entre 10^{-6} e 10^{-4} m/s, podendo estar associados com areias finas limpas, sendo que um valor de 10^{-5} m/s pode ser sugerido como uma primeira aproximação (KONIG E JESSBERGER, 1997 apud MARTINS, 2006). Diversos valores de coeficiente de permeabilidade para resíduos podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4- Coeficiente de permeabilidade para RSU

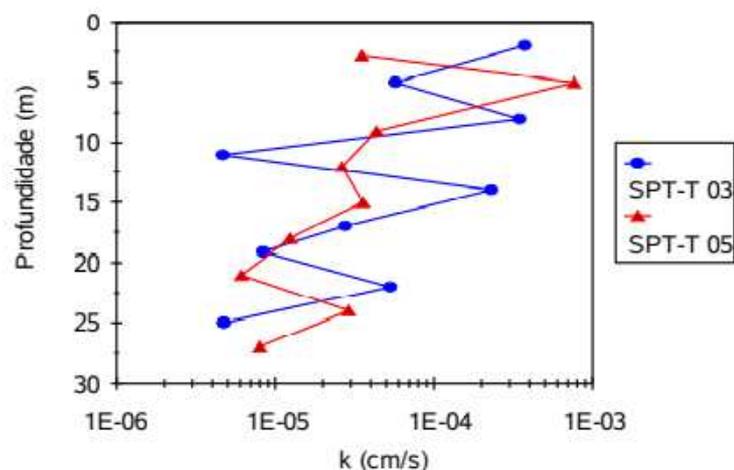
Método de ensaio	Coeficiente de permeabilidade (m/s)	Peso específico (kN/m ³)	Referência
Determinação em lisímetros	$1 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$	1,1 – 4	Fungaroli et al. (1979)
Ensaio de laboratório	$-3,15 \times 10^{-5} - 5,10 \times 10^{-5}$	8,6	Koriaties et al. (1983)
Estimativa de dados de campo	1×10^{-5}	6,45	Oweis & Khera (1986)
Ensaio de bombeamento	1×10^{-5}	6,45	Oweis et al (1990)
Ensaio de campo com carga variável	$1,5 \times 10^{-6}$	9,4 – 14	
Ensaio em poço	$1,1 \times 10^{-5}$	6,3 – 9,34	
Ensaio em poço	$1 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-4}$	10,1 – 14,4	Landva & Clark (1990)
Ensaio de laboratório	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-5}$	-	Gabr & Valero (1995)
Ensaio de campo em furos profundos (30-40m) e com carga variável	$3 \times 10^{-7} - 3 \times 10^{-6}$	9 – 11	Blengino et al. (1996)
Ensaio de bombeamento (15-20m de profundidade)	$1,5 \times 10^{-5} - 2,6 \times 10^{-4}$	8 – 10	Manassero et al (1990)
Ensaio de laboratório com pessao de confinamento de 0 – 600	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-4}$	5 – 13	Beaven & Powrie (1995)

kPa			
Ensaio de campo com carga variável	$7 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-5}$	11 – 14	Brandl (1994)
Ensaio de poço	$3 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-6}$	13 – 16	
Ensaio de laboratório	$2 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-6}$	9 – 12	Brandl (1994)
	$5 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-5}$ (pré-tratado)	9 – 12	
	$2 \times 10^{-6} - 3 \times 10^{-5}$ (muito compactado)	13 – 17	
Antes da compactação dinâmica	$1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-3}$	RSU misturado com entulho	Jessberger (1984)
Depois da compactação dinâmica	$3 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-5}$		
Antes da compactação dinâmica	$4 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-3}$	RSU misturado com entulho	Jessberger (1984)
Depois da compactação dinâmica	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-4}$		
Ensaio <i>in situ</i> em furo de sondagem	1×10^{-7}	14 – 19	Santos et al. (1998)
Ensaio <i>in situ</i> em furo de sondagem	$3 \times 10^{-7} - 2,5 \times 10^{-6}$	-	Blegino et al. (1996)

Fonte: Carvalho (1999)

Carvalho (1999), ao realizar ensaios de infiltração em dois furos de sondagem, observou uma grande variação nos valores de coeficiente de permeabilidade, como pode ser visto na Figura 10. O autor notou também a tendência do coeficiente reduzir o seu valor com o aumento da profundidade, em virtude do efeito da consolidação do RSU, resultante da sobrecarga provocada pelas camadas subjacentes.

Figura 10- Coeficiente de permeabilidade do RSU em função da profundidade



Fonte: Carvalho (1999)

É importante ressaltar que a permeabilidade dos RSU interfere diretamente na estabilidade dos aterros sanitários, pois, quanto maior for o acúmulo de líquidos e gases na massa de resíduos, maiores serão os valores de poropressões geradas e, então, menor será a resistência do material em questão.

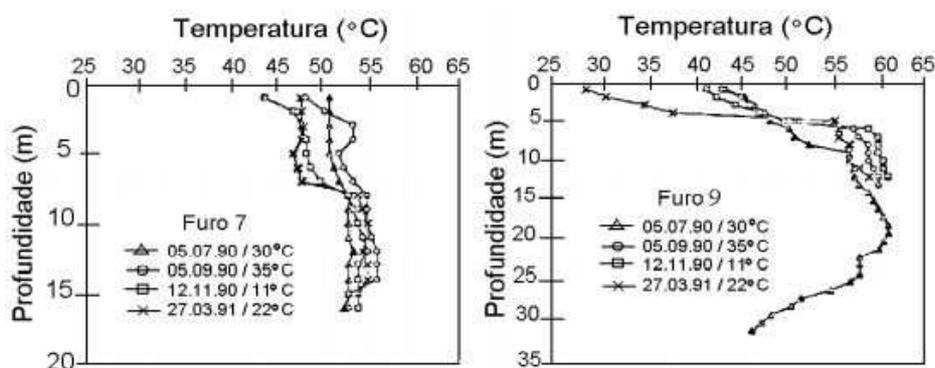
2.3.6 Temperatura

O aumento da temperatura é um dos produtos do processo de biodegradação, juntamente com a geração de chorume e de gás. Assim, os resíduos sólidos urbanos apresentam uma variação significativa da temperatura ao longo da profundidade e do tempo, sendo um dos indicadores das reações bioquímicas que ocorrem no interior da massa de lixo.

As temperaturas registradas em aterros sanitários variam entre 40 e 65 °C para aterros com alturas entre 20 e 60 metros. Para a produção de biogás, produto da decomposição anaeróbia dos resíduos, a temperatura considerada ideal é entre 34 e 45 °C. Segundo Tchobanoglous et al. (1993, apud Abreu, 2015), abaixo de 20 °C e acima de 75 °C, há a diminuição significativa na produção de biogás.

Conforme pode ser visto na Figura 11, em um estudo realizado no aterro Ano Liossia, localizado em Atenas (Grécia), as temperaturas dos resíduos variam entre 40 e 60 °C e essas temperaturas não foram afetadas pelas mudanças na temperatura ambiente.

Figura 11- Variação da temperatura do RSU com a profundidade

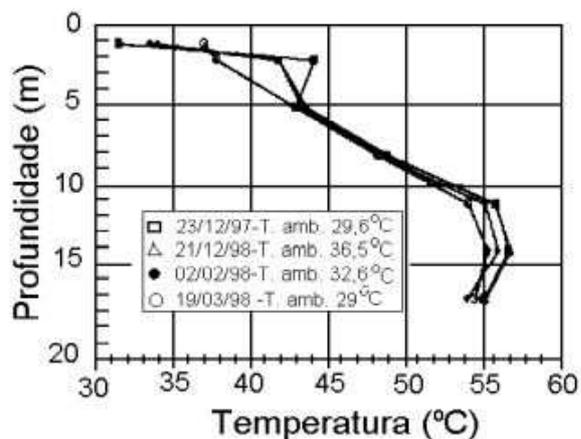


Fonte: Coumoulos et al. (1995, apud Nascimento, 2007)

Em um estudo realizado no aterro da Muribeca, localizado em Recife, observou-se que a temperatura dos RSU varia entre 30° a 60°C, sendo crescente com a profundidade entre 5,0 a

10,0 m e tendendo a se estabilizar a partir de 10,0 m. Novamente, não foi notado variação na temperatura do resíduo frente à mudança da temperatura ambiente (Figura 12)

Figura 12- Variação da temperatura do RSU com a profundidade



Fonte: Mariano e Jucá (1998, apud Carvalho, 1999)

Segundo Ress (1980, apud El-Fadel, 1999, apud Abreu, 2015), a distribuição de temperatura no maciço de resíduos não é homogênea e depende de diversos fatores, como: calor de reação, calor específico da água e dos resíduos, calor de neutralização, perdas de calor para meio ambiente, radiação solar e, principalmente, metabolismo aeróbio.

2.4 Propriedades Mecânicas dos RSU

As principais propriedades dos RSU (compressibilidade e resistência ao cisalhamento) são bastante influenciadas pela composição e estado de alteração do resíduo bem como pelo comportamento mecânico de cada material.

2.4.1 Compressibilidade

Os RSU são altamente compressíveis e os recalques de maciços de aterros sanitários são muito elevados quando comparados com o de maciços de solos. A alta compressibilidade dos RSU está relacionada às ações mecânicas (peso próprio, sobrecarga aplicada); reorientação das partículas menores, devido à percolação de líquidos; transformações dos resíduos por

reações físicoquímicas (oxidação, corrosão) e à decomposição bioquímica, com consequente perda de massa por meio de do escape de gases e percolados (OLIVEIRA, 2002). Alguns valores de recalques em relação à espessura total dos aterros sanitários são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5- Recalques em maciços sanitários

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

Fonte: Boscov (2008)

A estimativa dos recalques dos maciços e das velocidades em que ocorrem é importante para determinar a vida útil do aterro sanitário, o projeto e a implantação dos sistemas de drenagem superficial e de efluentes, o monitoramento geotécnico, o desempenho do sistema de cobertura final e a possibilidade de reaproveitamento das áreas após o encerramento da disposição.

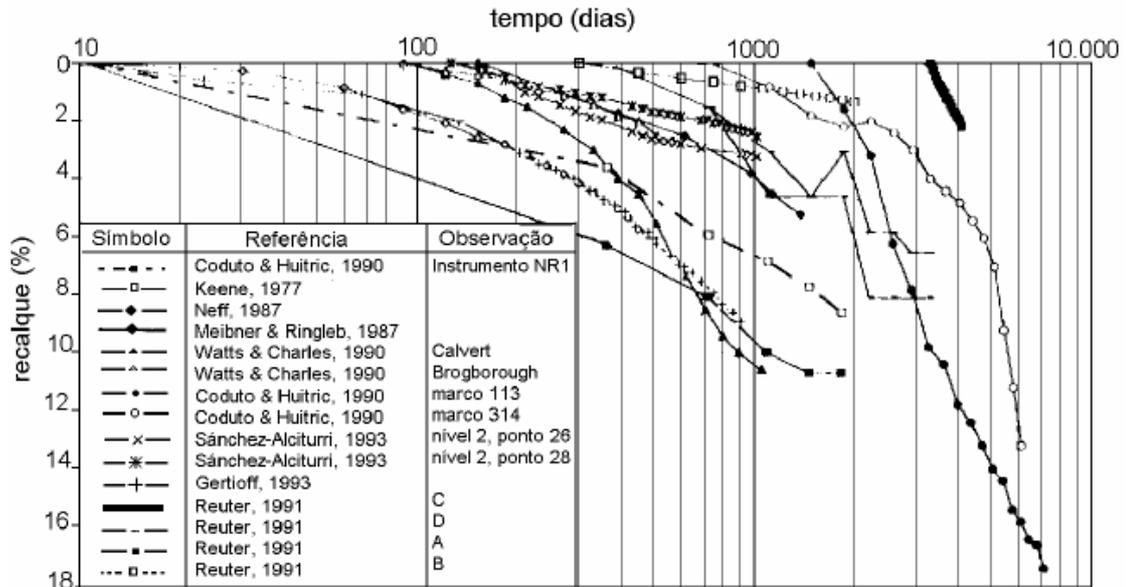
Manassero et al. (1996, apud Carvalho, 1999) propuseram que o mecanismo de recalque em aterros sanitários pode ser representado pelas seguintes fases:

- Compressão mecânica resultante do rearranjo e da quebra de elementos sólidos devido ao peso próprio do RSU e peso dos materiais de cobertura;
- Variação de volume causada pela migração de pequenas partículas para os vazios maiores (erosão e ravinamentos internos);
- Creep: deformação lenta sob carga constante em razão de fenômenos viscosos, envolvendo o esqueleto sólido e as partículas individuais ou componentes;
- Recalques de decomposição devido à biodegradação dos componentes orgânicos;
- Colapso dos componentes devido às alterações físico-químicas como a corrosão, oxidação e degradação dos componentes inorgânicos;
- Dissipação da pressão neutra de líquidos e gases.

Na Figura 13 são apresentadas as curvas com as taxas de recalques de superfície com o logaritmo do tempo. As medidas referem-se à aterros com resíduos sólidos urbanos da Europa

e da América do Norte com diferentes composições e idades, sendo que o tempo zero corresponde ao final do período de operação do aterro. Em alguns casos é possível observar uma inflexão das curvas, mostrando a tendência de uma possível estabilização dos recalques, enquanto, em outros casos, não apresentam nenhuma mudança significativa em sua curvatura, com tendência de manutenção das velocidades e aumento dos valores de recalque.

Figura 13- Medidas de recalques de superfície de diferentes aterros



Fonte: König & Jessberger (1997, apud Suzuki, 2012)

O estudo de recalques de maciços de resíduos foi iniciado por Sowers em 1973, que adaptou a teoria de adensamento de Terzaghi para RSU, utilizando parâmetros obtidos por ensaios de laboratórios e monitoramento de campo. Essa adaptação passou a ser denominada Modelo Clássico de compressão de RSU e, segundo ela, o recalque de maciços sanitários é dividido em três fases:

- Compressão inicial (ou imediata): é quantificada pela teoria da elasticidade, está associada à compressão dos vazios e dos constituintes por ação das cargas impostas e pelo processo de operação dos aterros;
- Compressão Primária: é devida à drenagem dos líquidos existentes no interior do aterro, ocorre geralmente dentro de 30 dias após a aplicação da carga;
- Compressão Secundária: é proveniente da degradação físicoquímica e biológica que ocorre no aterro. Os recalques nesta fase podem durar décadas e é responsável pela maior parcela de recalques, seguindo uma relação linear com o logaritmo do tempo.

O Modelo Clássico é o mais utilizado para estimar e prever os recalques de RSU, devido a sua simplicidade e ao número de dados armazenados na literatura especializada. Entretanto, as hipóteses simplificadoras da teoria de Terzaghi são pouco adequadas para os resíduos: validade da lei de Darcy, completa saturação do meio, partículas sólidas homogêneas e do fluido intersticial, independência de algumas propriedades com a variação da tensão efetiva, compressão unidimensional, fluxo unidimensional e relação da tensão com o índice de vazios linear. Além disso, a divisão do desenvolvimento de recalques em iniciais, primários e secundários podem não ser adequados, pois não representam todos os mecanismos importantes de compressão no maciço sanitário, e essas fases não são independentes no tempo, podendo ocorrer simultaneamente (BOSCOV, 2008).

Vários são os modelos já existentes para a previsão de recalques em aterros sanitários, e novos modelos vem sendo propostos, desde os puramente teóricos, até aqueles que se resumem ao ajuste de curvas quando já existe algum histórico de recalques. O Modelo Matemático de Zimmerman et al. (1977 apud BOSCOV, 2008) é um modelo teórico que expressa todos os mecanismos de recalque relevantes para RSU, porém possui um grande número de parâmetros, alguns de difícil obtenção, o que limita sua aplicação prática. O modelo de Meruelo (1994 e 1995 apud BOSCOV, 2008) considera apenas a biodegradação anaeróbia, fundamental nos recalques de longo prazo, por meio de parâmetros com significado físico, aplicando-se bem à aterros antigos. Simões e Campos (2003 apud BOSCOV, 2008) e Marques et al. (2002 apud BOSCOV, 2008) desenvolveram modelos visando conformar o comportamento reológico dos RSU. Existem vários modelos empíricos, como os Modelos Logarítmico de Yen e Scanlon (1975 apud BOSCOV, 2008), de Gandolla et al. (1994 apud BOSCOV, 2008), das Isotacas ou ABC (Van Meerten et al., 1995 apud BOSCOV, 2008), de Atenuação (Coumoulos e Koryalos, 1997 apud BOSCOV, 2008), Hiperbólico de Ling et al. (1998), entre outros. A vantagem principal dos modelos empíricos é a simplicidade, e a desvantagem é a impossibilidade de previsão de recalque em projeto, já que é necessária uma quantidade inicial de dados de recalque para ajustar o modelo (BOSCOV, 2008).

2.4.2 Resistência ao Cisalhamento

As análises de estabilidade de taludes são feitas para avaliar as condições de segurança de aterros. Essas análises são baseadas em métodos clássicos da teoria do equilíbrio limite,

usadas para solos. Estes métodos baseiam-se na hipótese de haver equilíbrio em uma massa na iminência de entrar em um processo de escorregamento. Tendo as forças atuantes conhecidas, são determinadas, por meio das equações de equilíbrio, as tensões cisalhantes induzidas, obtendo-se, desta forma, a resistência ao cisalhamento do material em questão. Para a execução dessas análises é necessário o conhecimento da geometria do aterro, das condições de poropressões nos líquidos e gases no interior do maciço e dos parâmetros de resistência dos resíduos (normalmente são usados ângulo de atrito, coesão e peso específico).

Entretanto, o grande problema da realização da análise de estabilidade de um aterro decorre da dificuldade de se obterem parâmetros de resistência de RSU, principalmente a coesão e o ângulo de atrito.

As principais dificuldades na obtenção desses parâmetros se devem a diversos fatores, entre eles: não homogeneidade dos RSU, variação da composição em diferentes locais, dificuldade da obtenção de amostras representativas de condições de campo, inexistência de procedimentos e normas que regularizem os processos para obtenção de amostras e de ensaios específicos para resíduos, alteração das propriedades físico-químicas e biológicas dos resíduos com o passar do tempo (FUCALE E JUCÁ, 2002).

Com relação às propriedades de resistência, ao analisar os resíduos, percebe-se que mesmo sendo material heterogêneo, que apresenta variações ao longo do tempo, com diversos estados de alteração, os resíduos apresentam um comportamento bastante distinto de outros materiais geotécnicos, como os solos e rochas, por exemplo. A curva tensão-deformação dos RSU não apresentam pico de ruptura, mesmo quando são atingidas grandes deformações (KONIG E JESSBERGER, 1997 apud NASCIMENTO, 2007). À medida que as deformações aumentam, os RSU apresentam maior resistência, uma vez que os materiais fibrosos presentes na sua constituição exercem grande influência no comportamento mecânico desse material (NASCIMENTO, 2007).

A resistência ao cisalhamento dos RSU pode ser determinada por meio de ensaio *in situ*, ensaios de laboratório (compressão triaxial, cisalhamento direto) em dispositivos de grandes dimensões e por meio de retroanálises com base em dados e registros de monitoramento. Dixon e Jones (2005) elaboraram uma tabela (Tabela 6) que apresenta um resumo dos principais métodos disponíveis para a determinação do comportamento resistente dos RSU.

Tabela 6- Métodos para a determinação da resistência dos RSU

LOCAL	MÉTODO DE MEDIDA	COMENTÁRIOS	REFERÊNCIA
Campo	Retroanálise de rupturas de talude	Informação adequada raramente disponível	Koemer e Soong (2000)
	Retroanálise de ensaios de corte em taludes	Grandes deformações observadas, mas sem apresentar ruptura	Singh e Murphy (1990), Cowland et al. (1993)
	Retroanálise de taludes estáveis	A variável composição do RSU significa que a experiência passada não é um guia para desempenho futuro	Gotteland et al. (2002)
	Ensaio de cisalhamento <i>in situ</i>	Dificuldades de execução e os resultados relacionados a baixos níveis de tensão	Jessberger e Kockel (1993)
	SPT, CPT e ensaio de palheta	Não há relação clara entre a resistência à penetração e a resistência ao cisalhamento dos RSU Poderia fornecer informação em materiais degradados semelhantes a solos	-
Laboratório	Compressão triaxial	Amostras deformadas Resistências ao cisalhamento de pico não obtidas devido à compressão e densificação da amostra	Jessberger (1994), Grisolia et al. (1995b)
	Cisalhamento direto	Exigência de grandes equipamentos Amostras deformadas Grandes deslocamentos exigidos para mobilizar a resistência ao cisalhamento de pico	Kolsch (1995), Gotteland et al. (2001)
	Cisalhamento simples	Exigência de grandes equipamentos Amostras deformadas Informação útil na rigidez cisalhante (usado em análises sísmicas)	Kavazanjian et al. (1999)

Fonte: Dixon e Jones (2005)

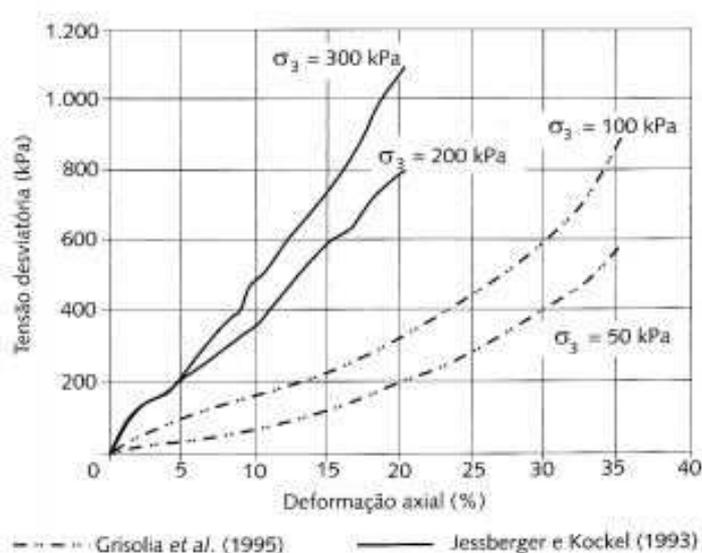
Em função da heterogeneidade do RSU, bem como do tamanho de suas partículas, os ensaios de laboratório são executados em equipamentos de grandes dimensões com a finalidade de possibilitar o emprego de amostras que sejam representativas. Os ensaios triaxiais e de cisalhamento direto tem sido os mais empregados para a determinação da resistência ao cisalhamento dos RSU. Esses ensaios são executados em amostras reconstituídas com materiais coletados de aterros sanitários.

Segundo König e Jessberger (1997, apud Martins, 2006), a principal limitação de ensaios de laboratório surge da dificuldade em obter amostras que representem bem o maciço, em

relação à distribuição granulométrica e composição. Dixon e Jones (2005) comentam que os resultados de ensaios de laboratório devem ser analisados cuidadosamente, pois, uma vez que a amostra de resíduos ensaiada é uma amostra reconstituída, a sua estrutura pode não ser representativa, já que grandes partículas podem ter sido removidas ou processadas e a densidade de campo e o estado de tensões podem ter sido alterados.

Na Figura 14 são apresentadas as curvas da tensão desviadora *versus* a deformação axial obtidas em ensaios de compressão triaxial de RSU obtidos de dois aterros sanitários europeus. Os ensaios foram realizados sob duas diferentes tensões confinantes. Pode-se observar que não existe um pico de resistência, indicando a ruptura, e nem há a tendência de atingir um valor máximo para a tensão desviadora. De forma diferente de outros materiais geotécnicos, nos RSU a tensão desviadora continua aumentando, mesmo para grandes deformações (BOSCOV, 2008).

Figura 14- Relação tensão *versus* deformação típica dos RSU

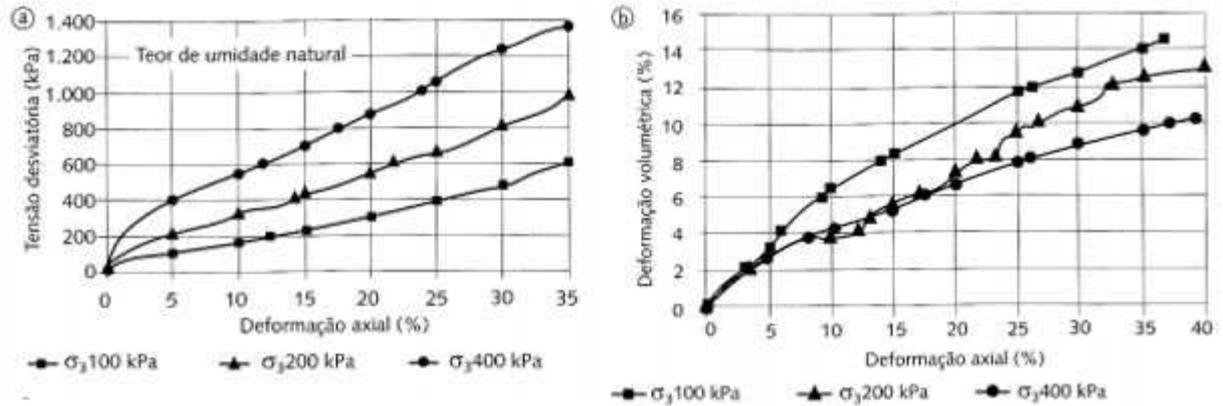


Fonte: Boscov (2008)

Na Figura 15 são apresentados os resultados de ensaios de resistência ao cisalhamento de RSU brasileiros, obtidos por meio de ensaios de compressão triaxial sob três diferentes tensões confinantes. A curva tensão deformação apresenta, novamente, tensões desviadoras crescentes com a deformação axial, sem apresentar um pico de ruptura ou a tendência de atingir um valor máximo. No gráfico de deformação axial *versus* deformação volumétrica é possível observar que os corpos de prova diminuem de tamanho durante o ensaio de

cisalhamento, apresentando deformações de 10% a 15% para as tensões confinantes de 100 kPa a 400 kPa.

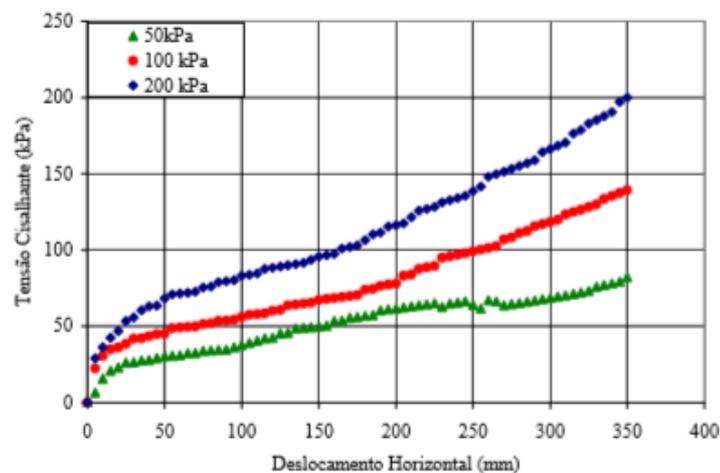
Figura 15- Comportamento tensão deformação dos RSU: (a) tensão desviadora *versus* deformação axial; (b) deformação volumétrica *versus* deformação axial



Fonte: Boscov (2008)

Ao realizar ensaio de cisalhamento direto em amostras de resíduos do aterro sanitário de Belo Horizonte, Martins (2006) obteve as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para diferentes níveis de tensão normal, como pode ser visto na Figura 16. O resíduo ensaiado se caracterizava por ser um resíduo fresco, com presença de materiais fibrosos (papalão, plástico, tecido e podas) e com o peso específico de 10 kN/m^3 .

Figura 16- Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para resíduos com fibras

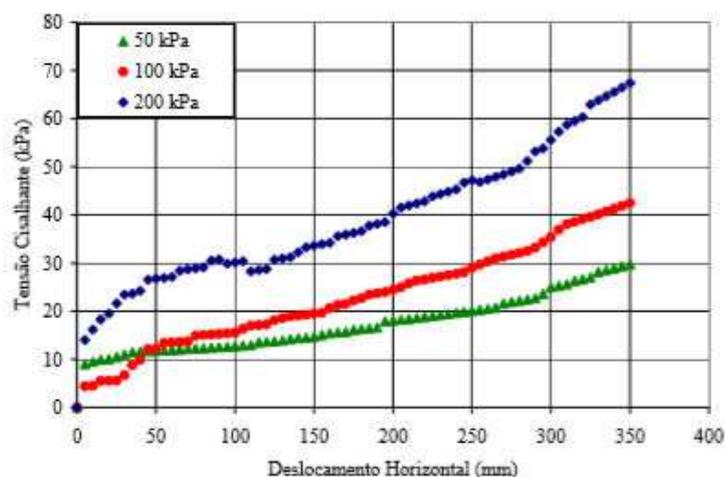


Fonte: Martins (2006)

Como pode ser observado, as curvas mostram um ganho contínuo de resistência, sem apresentar um pico de ruptura, sendo um aspecto característico de materiais com presença de fibras.

Martins (2006) fez o mesmo ensaio para resíduos fresco, sem a presença de materiais fibrosos e com o peso específico de 10 kN/m^3 . As curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para diferentes níveis de tensão normal obtidas pelo autor podem ser vistas na Figura 17.

Figura 17- Curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para resíduos sem fibras



Fonte: Martins (2006)

Novamente, as curvas mostram um ganho contínuo de resistência, sem apresentar um pico de ruptura. Segundo o autor, embora a composição das amostras destes ensaios não devesse apresentar materiais plásticos, papelão, tecidos e podas, isto não quer dizer que ela não possuísse materiais fibrosos e por isso o material apresenta tal aspecto, que é característico de materiais com presença de fibras. Porém a porcentagem desse tipo de material é bem menor do que no ensaio mostrado anteriormente.

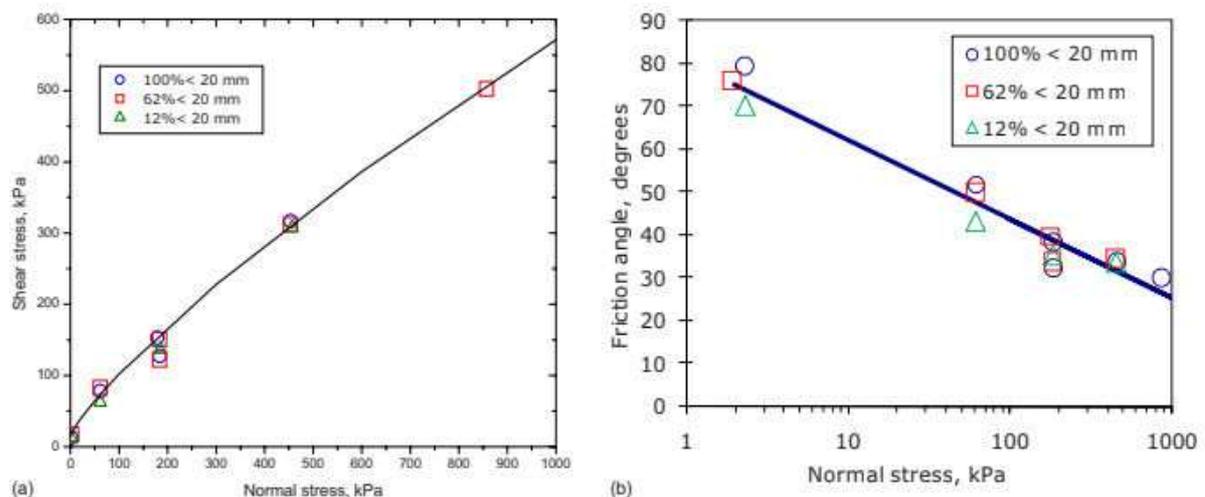
Ao comparar os resultados obtidos nos dois ensaios (figuras 16 e 17) é possível perceber que o material fibroso gera um acréscimo de resistência ao resíduo, uma vez que a amostra com presença de fibras atingiu uma tensão cisalhante de aproximadamente 200 kPa, 140 kPa e 75 kPa para as tensões confinantes de 200 kPa, 100 kPa e 50 kPa, respectivamente, e com o

deslocamento horizontal de 350 mm, enquanto a amostra sem a presença de fibras atingiu uma tensão cisalhante de aproximadamente 68 kPa, 42 kPa e 30 kPa para as tensões confinantes de 200 kPa, 100 kPa e 50 kPa, respectivamente, e com o deslocamento horizontal de 350 mm.

Bray et al. (2009) realizaram diversos testes de laboratório em larga escala usando ensaios de cisalhamento direto, triaxial e de cisalhamento simples em RSU recuperados de um aterro sanitário na área da baía de São Francisco.

Testes de cisalhamento direto foram realizados em amostras de RSU que possuíssem 100, 62 e 12% de constituintes com tamanho menor que 20 mm, em diversos valores de tensões normais. Conforme mostrado na Figura 18 (a), as fibras (materiais maiores que 20 mm) não pareciam contribuir significativamente para a resistência ao cisalhamento de resíduos nesta série de testes iniciais. Assumindo o valor da coesão como 5 kPa, o valor do ângulo de atrito diminuiu com o aumento da tensão Figura 18 (b).

Figura 18- Resistência ao cisalhamento direto do aterro sanitário Tri-Cities: (a) curva de resistência desenvolvida para amostras com composição variável de resíduos; b) variação do ângulo de atrito com aumento da tensão normal assumindo $c = 5$ kPa

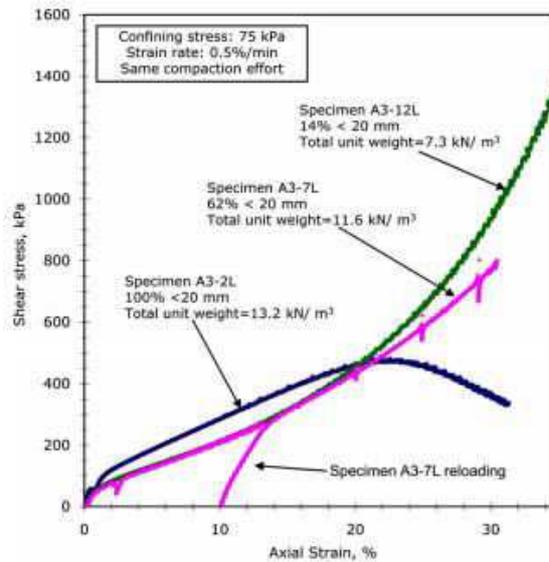


Fonte: Bray et al. (2009)

As amostras para ensaio de compressão triaxial foram feitas com diversos percentuais de partículas de resíduos fibrosos para avaliar os efeitos da composição dos resíduos na resistência ao cisalhamento. Neste ensaio as amostras de RSU foram preparadas com 100, 62

e 14% de constituintes com tamanho menor que 20 mm, sendo denominadas A3-2L, A3-7L e A3-12L, respectivamente. Os resultados são apresentados na Figura 19.

Figura 19- Ensaio de compressão triaxial para amostras com diferentes composições de resíduos

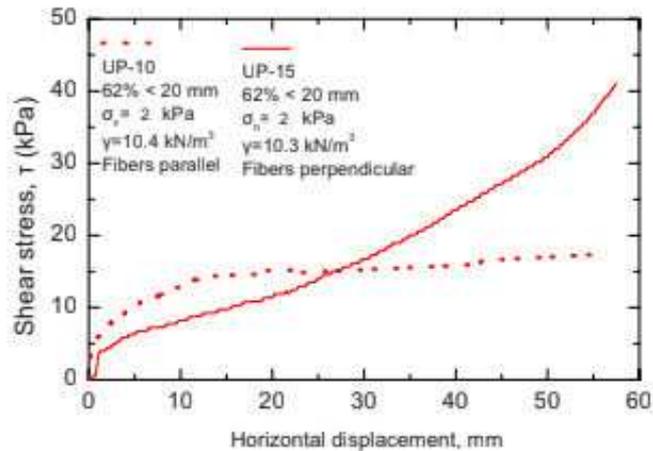


Fonte: Bray et al. (2009)

A amostra A3-2L, com partículas 100% menores 20 mm, atinge um pico de tensão de cisalhamento a uma deformação axial de cerca de 22% e, em seguida, exibe uma redução pós-pico na resistência ao cisalhamento. Quando o material fibroso (ou seja, maior que 20 mm) é incluído no amostra (por exemplo, amostra A3-7L com 62% menor que 20 mm), a amostra exibe inicialmente uma resposta mais suave que a amostra sem material fibroso, mas exibe uma curva ascendente em deformações superiores a 5% sem atingir um pico de cisalhamento. A amostra A3-12L, que possui 14% de partículas menores que 20 mm, tem um aumento ainda mais pronunciado na sua curva tensão-deformação para deformações superiores a 15% em comparação com a amostra A3-7L.

Bray et al. (2009) também realizaram testes de cisalhamento direto mudando a orientação das partículas fibrosas. Para isso, os autores rotacionaram a amostra em 90° antes de colocá-la no dispositivo, permitindo que o eixo do material fibroso ficasse orientado perpendicularmente à superfície de cisalhamento horizontal da caixa de cisalhamento. Os resultados obtidos dos ensaios realizados com composições iguais de resíduo (62% de partículas menores que 20 mm), com peso específico parecido e baixa tensão confinante podem ser vistos na Figura 20.

Figura 20- Comparação dos resultados dos testes de cisalhamento direto para amostras em que as fibras são orientadas paralelamente ou perpendicularmente a superfície de cisalhamento horizontal



Fonte: Bray et al. (2009).

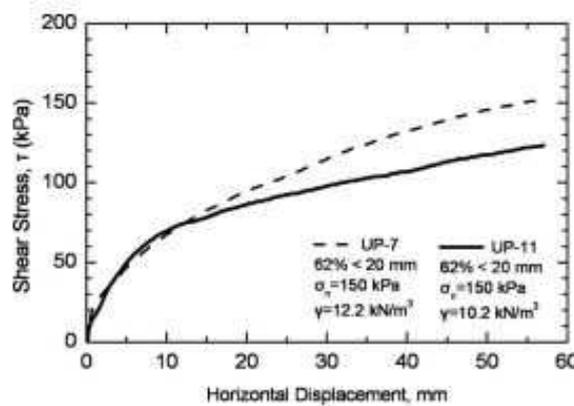
Nos resultados mostrados na Figura 20, a amostra que apresentam os eixos das fibras orientados horizontalmente, ou seja, paralelos à superfície cisalhante, é chamada de amostra UP-10, enquanto a amostra que apresenta os eixos das fibras orientados perpendicularmente à superfície de cisalhamento é chamada de amostra UP-15. A amostra UP-15 mostra uma resposta mais suave, inicialmente, seguida por uma curvatura ascendente da curva tensão-deslocamento. A amostra UP-10 apresenta uma curva tensão-deformação com forma hiperbólica. Para um deslocamento horizontal de 55 mm, a tensão de cisalhamento mobilizada na amostra UP-15 é o dobro da amostra UP-10. À medida que a tensão normal aplicada aumenta, a diferença nas respostas observadas diminui.

Bray et al. (2009) também estudaram o efeito do peso específico inicial da amostra sobre a resistência ao cisalhamento.

Várias amostras para ensaios de cisalhamento direto foram preparadas com diferentes pesos específicos e depois carregadas com uma tensão normal de 150 kPa. Como resultado da aplicação da tensão normal, os valores de peso convergiram antes do cisalhamento. Por exemplo, amostras de resíduos que foram compactadas inicialmente com o peso específico de 8,5 kN/m³, ao serem carregadas com carga normal de 150 kPa, tiveram seu peso específico aumentado para 10,2 kN/m³. Outra amostra que tinha peso específico inicial de 11,4 kN/m³,

passou a apresentar $12,2 \text{ kN/m}^3$ sob a carga normal de 150 kPa . Os autores observaram que apesar da convergência do peso específico, a força de cisalhamento mobilizada se mostrava diferente, como pode ser visto na Figura 21.

Figura 21- Efeito do peso específico na resistência ao cisalhamento de amostras com 62% de material menor que 20 mm , em peso, com tensão normal de 150 kPa



Fonte: Bray et al. (2009)

Segundo Bray et al., vários pares de amostras semelhantes foram ensaiadas para avaliar os efeitos da variação do peso específico na tensão cisalhante mobilizada. Nestes ensaios, a força mobilizada dos resíduos diferiu até 25% para diferenças de peso unitário de 5 a 20%, com maior peso unitário resultando em maior resistência. Com isso, os autores consideraram o peso específico como um fator potencialmente importante na estimativa da resistência ao cisalhamento.

2.5 Parâmetros de Resistência de RSU

Para a execução de análises de estabilidade é necessário o conhecimento da geometria do aterro, das condições de poropressões nos líquidos e gases no interior do maciço e dos parâmetros de resistência dos resíduos (ângulo de atrito, coesão e peso específico). Entretanto, o grande problema da realização dessas análises decorre da dificuldade de se obterem parâmetros de resistência de RSU, principalmente a coesão e o ângulo de atrito.

Nas primeiras análises de estabilidade realizadas no Brasil, os dados de parâmetros de resistência eram obtidos em literaturas internacionais, o que geravam problemas relacionados à confiabilidade das análises, uma vez que os resíduos brasileiros têm características

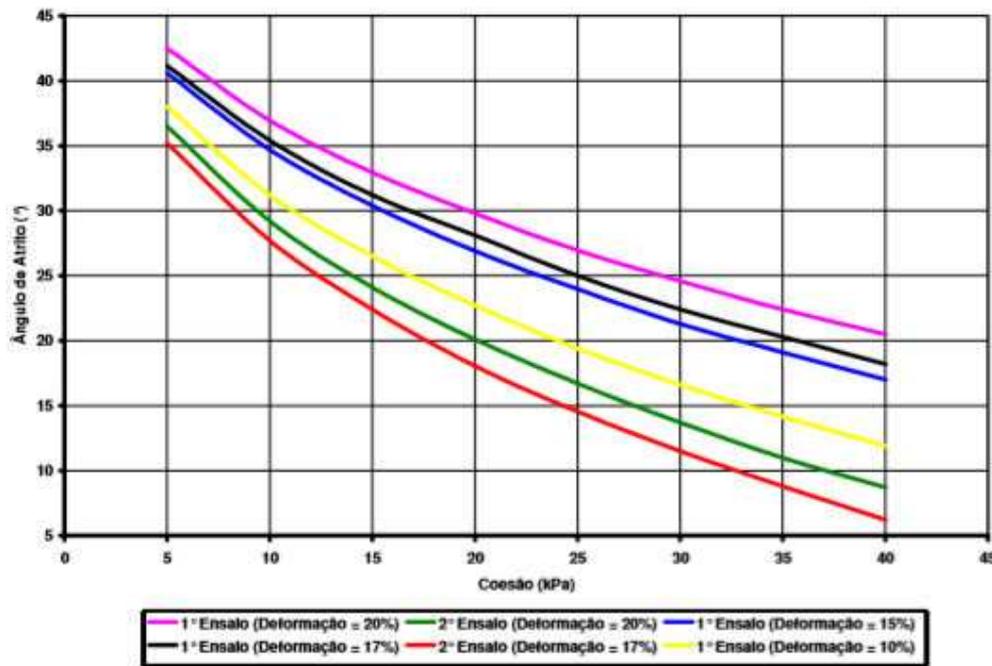
diferentes dos resíduos de outros países. Em 1991, com o rompimento do Aterro de Bandeirantes, as primeiras retroanálises foram realizadas, possibilitando estimativas de parâmetros de resistência mais reais (BOSCOV, 2008). Considerando condições de poropressão crítica, Benvenuto e Cunha (1991) obtiveram como ângulo de atrito e coesão os valores de 22° e 13,5 kPa, respectivamente. Esses valores passaram então a ser a referência para projetos nacionais.

Daciolo et al. (2018), realizaram uma síntese de 12 trabalhos disponibilizados na literatura, avaliando estatisticamente dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento e peso específico dos RSU, totalizando 171 pares de coesão e ângulo de atrito. Nos trabalhos avaliados o ângulo de atrito variou $2,7^\circ$ a 55° e a coesão variou de 0,93 a 80 kPa.

É importante ressaltar que variação desses valores se deve às diferentes composições de RSU utilizadas nos vários ensaios, bem como o tipo de ensaio utilizado, os diferentes equipamentos empregados nos ensaios, além de uma ausência de procedimentos padronizados na realização destes ensaios quando realizados em resíduos.

Ribeiro (2007) realizou ensaios de prova de carga confinado em laboratório com o uso de uma sapata apoiada em RSU dispostos em manilhas de concreto, que apresentava cerca de 1,6 m de altura e 1 m de diâmetro, para obtenção de parâmetros de resistência de RSU. Para tanto, o autor variou as deformações entre 10% e 20% para os pesos específicos de 5kN/m^3 e 7kN/m^3 . Na Figura 22 são apresentados os resultados obtidos para o primeiro ensaio (PE7 - 7kN/m^3) e para o segundo ensaio (PE5 - 5kN/m^3).

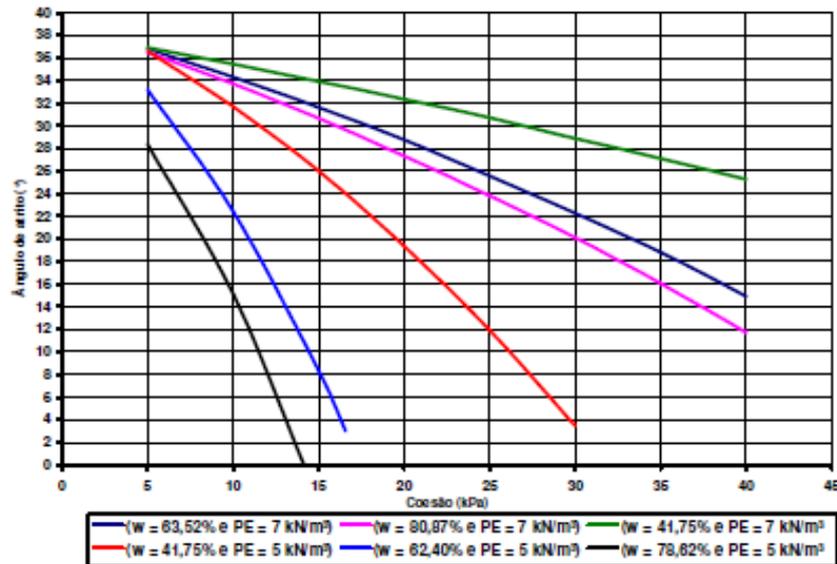
Figura 22- Parâmetros de Resistencia em função da deformação e do peso específico



Fonte: Ribeiro (2007)

Segundo Ribeiro (2007) os resultados encontrados foram coerentes com a literatura, já que para uma deformação de 17% e peso específico de 7 kN/m³, encontrou-se um ângulo de atrito de 35,4°, para um valor de coesão igual a 10 kPa, que é comumente adotado em análises de aterros sanitários. Para o peso específico de 5 kN/m³ e uma deformação de 17%, o autor encontrou um ângulo de atrito de 27,7°, para coesão de 10 kPa. Esses valores estão em conformidade com os encontrados por Azevedo (2005 apud RIBEIRO, 2007), que recomenda os valores de ângulo de atrito igual a 28° e coesão igual 10 kPa para projetos de aterros sanitários.

Ribeiro (2007) também realizou ensaios de prova de carga em taludes de lixo feitos em uma caixa de madeira, com medidas de 80x80x80 cm, sendo que a carga foi aplicada por meio de uma sapata rígida de madeira com 70 cm de comprimento por 10 cm de largura e 10 cm de altura. O ensaio foi realizado variando o peso específico entre 5 kN/m³ e 7 kN/m³ e a umidade, como pode ser observado na Figura 23.

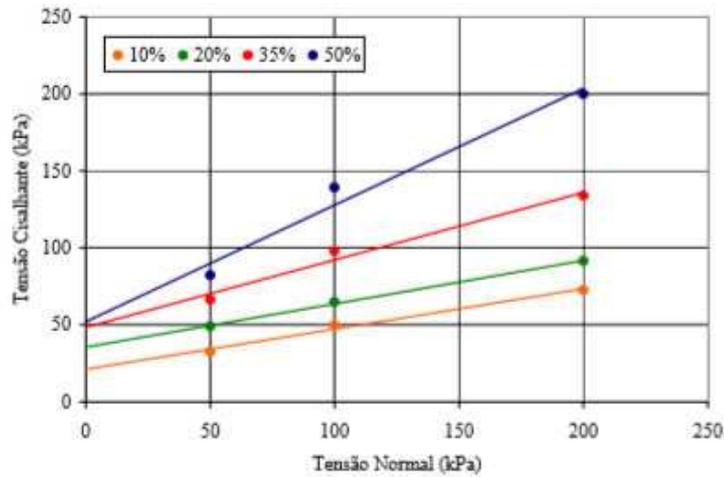
Figura 23- Curva Coesão *versus* Ângulo de Atrito

Fonte: Ribeiro (2007)

O autor observou que a tensão de ruptura é menor nos ensaios realizados com peso específico igual a 5 kN/m³, além disso, quanto maior a umidade, menor é a resistência dos resíduos. Para uma coesão de 10 kPa, os valores de ângulo de atrito encontrados variaram entre 15° e 35,5°, aproximadamente.

A partir das curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal, obtidas por ensaio de cisalhamento direto em amostras de resíduos do aterro sanitário de Belo Horizonte apresentadas nas Figuras 16 e 17, Martins (2006) obteve as envoltórias de ruptura desses resíduos, em função dos diferentes níveis de deslocamento horizontal, uma vez que mesmo para o deslocamento máximo, correspondente a um deslocamento de 50%, não houve ruptura em nenhuma das amostras, como pode ser visto na Figura 24 e 25.

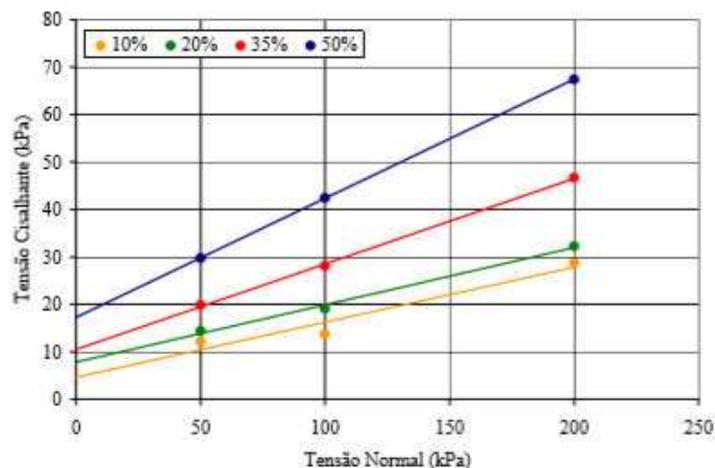
Figura 24- Envoltória de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal para resíduo com fibras variando o deslocamento



Fonte: Martins (2006)

Por meio das retas apresentadas na Figura 24, os resultados obtidos para um deslocamento de 20% os parâmetros de resistência são $15,7^\circ$ para o ângulo de atrito e 35,6 kPa para a coesão. Esses valores são bastante distintos dos valores obtidos por Ribeiro (2007) e do proposto por Azevedo (2005 apud RIBEIRO, 2007), apresentando um ângulo de atrito menor do que o proposto pelo autor (28°) e uma coesão muito maior do que o recomendando (10 kPa).

Figura 25- Envoltória de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal para resíduo sem fibras



Fonte: Martins (2006)

Por meio das retas apresentadas na Figura 25, os resultados obtidos para um deslocamento de 20% os parâmetros de resistência, os parâmetros de resistência são $6,9^\circ$ para o ângulo de atrito e 7,8 kPa para a coesão.

Comparando os resultados dos ensaios, pode-se perceber que os parâmetros de resistência para os materiais considerados sem fibras foram significativamente menores do que os resíduos com a presença de materiais plásticos, papelão, tecidos e podas, mostrando a importância das fibras para que os resíduos tenham um comportamento mecânico semelhante ao de solos reforçados.

Ao realizar ensaio de cisalhamento direto em resíduos de diferentes idades sobre condições drenadas, Abreu (2015) observou que se considerando envoltórias com deslocamento de 20% os parâmetros de resistência para o resíduo com 2 anos de idade foram de 13,7 kPa para a coesão e 22° para o ângulo de atrito. Esses valores são bem parecidos com os encontrados por Benvenuto e Cunha (1991) ao fazerem a retroanálises da ruptura do Aterro de Bandeirantes. Para resíduos mais degradados, o autor pôde perceber que não existem grandes diferenças nos parâmetros de resistência para resíduos aterrados há 5 ou há 25 anos. Os parâmetros de resistência encontrados para resíduos muito degradados foram de 4,4 kPa para a coesão e 30° para o ângulo de atrito.

Carvalho (1999) realizou ensaios de compressão triaxial em amostras de RSU remoldadas, coletadas por meio de dois furos de trados (40 cm de diâmetro), até cerca de 30 m de profundidade. O ensaio foi realizado em amostras de diferentes tamanhos, 15 por 30 cm e 20 por 40 cm. Como resultado o autor observou que os parâmetros de resistência do resíduo são altamente dependentes da deformação da amostra, não sendo possível atingir um pico de ruptura ou valor último nas curvas tensão deformação. Para os corpos de prova de 15x30 cm e considerando a deformação axial de 20%, obtiveram-se um ângulo de atrito de 27° uma coesão variando de 42 a 55 kPa. Já nos corpos de prova de 20x40 cm o ângulo de atrito obtido foi de 21° e a coesão variou entre 45 e 60 kPa. O autor ressalta ainda que as dimensões dos corpos de prova parecem influenciar nos resultados e parâmetros de resistência ao cisalhamento dos resíduos, sendo que os corpos de prova de menor dimensão apresentam resistência maior que os corpos de prova maiores.

Na tabela 7 são apresentados parâmetros de resistência obtidos por diversos autores.

Tabela 7- Parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU

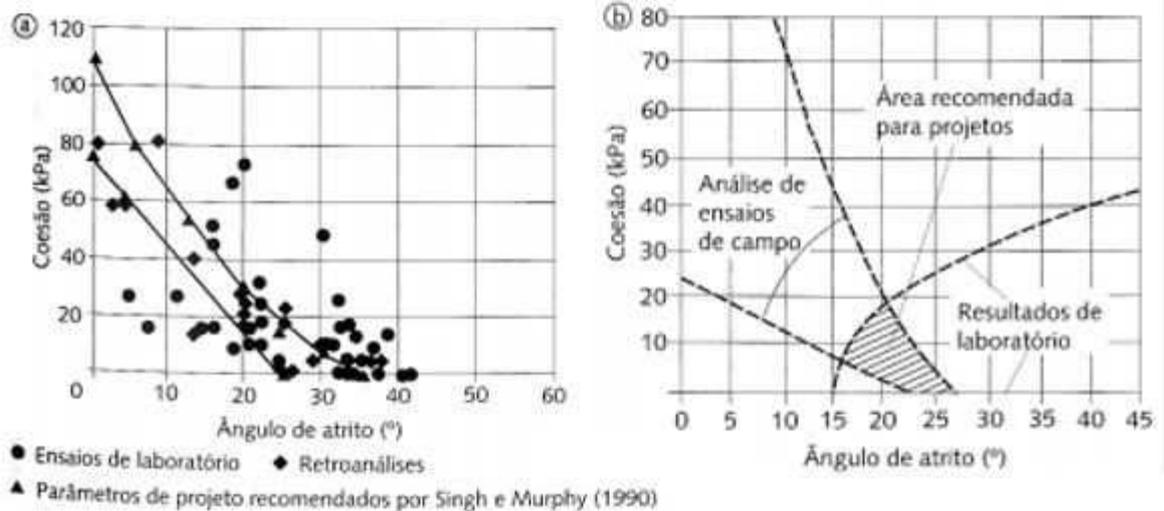
Autor	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Observações
Landva e Clark (1990)	19 a 22	24 a 39	Ensaio de cisalhamento direto, tensão normal superior a 480 kPa
Jessberger (1995)	41 a 51	42 a 49	Resíduos novos
Richardson e Reynolds (1991)	10	18 a 43	Tensão normal de 14 a 38 kPa
Gabr e Valero (1995)	0 a 27,5	20,5 a 39	Resíduo antigo
Grecco e Oggeri (1993)	16	21	Peso específico igual a 5 kN/m ³
IPT (1991)	13,5	22	Retroanálise de escorregamento
Pagotto e Rimoldi (1987)	29	22	Prova de carga em maciço sanitário
Howland e Landva (1992)	17	33	Resíduos de 10 a 15 anos, ensaio de cisalhamento direto, tensão normal de 580 kPa e deslocamento de 10 cm
Withiam et al. (1995)	10	30	Resíduos de 3 e 7,5 anos, ensaio de cisalhamento direto, tensão normal entre 0 e 21 kPa
Kavazanjian et al. (1995)	24	0	Tensão normal < 30 kPa (resultado de diversos autores)
	0	33	Tensão normal > 30 kPa
Van Impe (1998)	22	0	Tensão normal < 20 kPa (resultado de diversos autores)
	0	38	Tensão normal > 20 kPa
Carvalho (1999)	42 a 60	21 a 27	Ensaio de laboratório, deformação axial de 20%
Kaimoto e Cepollina (1996)	13,5	22	Retroanálise de escorregamento:
	16	22	Resíduo antigo
	16	28	Disposição superior a 2 anos e drenagem interna intensa
Vilar et al. (2006)	20	22	Resíduos recentes, com disposição inferior a 2 anos e drenagem interna intensa
Vilar et al. (2006)	20	22	Ensaio de laboratório, deformação axial de 10%
Azevedo et al. (2006)	10	28	Prova de carga em lisímetro com lixo intacto e fórmulas de capacidade de carga de sapatas, 35% de deformação

Fonte: Boscov (2008)

Na tabela 7, é possível observar a grande variabilidade dos parâmetros de resistência obtidos por diversos autores. Dentro dos valores apresentados, a coesão varia de 0 a 60 kPa e o ângulo de atrito varia de 20,5° a 49°. É importante considerar que os materiais analisados são diferentes, variando a composição dos resíduos e tempo de aterramento, além de serem usadas amostras deformadas ou ensaios diretos em campo. As metodologias utilizadas para obtenção dos parâmetros de resistência também variam entre ensaios de cisalhamento direto, ensaios de compressão triaxial, provas de carga e retroanálises de rupturas (BOSCOV, 2008).

Alguns autores procuraram sistematizar as variações encontradas nos parâmetros de resistência de RSU, definindo faixas de valores para serem adotadas em projetos. Esses valores podem ser observados na Figura 26.

Figura 26- Faixa de valores de parâmetros de resistência dos RSU recomendados: (a) segundo Bouazza e Wojnarowicz, 1999; (b) segundo Sanchez-Alciturri et al., 1993, modificado por Lamare Neto, 2004



Fonte: Boscov (2008).

Pelos gráficos apresentados na Figura 26, é observado que Bouazza e Wojnarowicz, (1999, apud BOSCOV, 2008) recomendam valores entre 25° e 35° para o ângulo de atrito considerando a coesão nula. Já Sanchez-Alciturri et al. (1993, apud BOSCOV, 2008) sugerem valores de ângulo de atrito 22,5° e 27° para uma coesão igual a 0 kPa.

2.6 Método de Equilíbrio Limite

Os métodos determinísticos de análises de estabilidade de taludes estão divididos, basicamente, em dois grupos: os que se baseiam em análise dos deslocamentos e os que se baseiam em estado de equilíbrio limite.

O equilíbrio limite é uma ferramenta empregada pela teoria da plasticidade para análises do equilíbrio dos corpos, em que se admite como hipótese:

- existência de uma linha de escorregamento de forma conhecida: plana, circular, espiral-log ou mista, que delimita, acima dela, a porção instável do maciço. Esta massa de solo instável, sob a ação da gravidade, movimenta como um corpo rígido;
- respeito a um critério de resistência, normalmente utiliza-se o de Mohr-Coulomb, ao longo da linha de escorregamento.

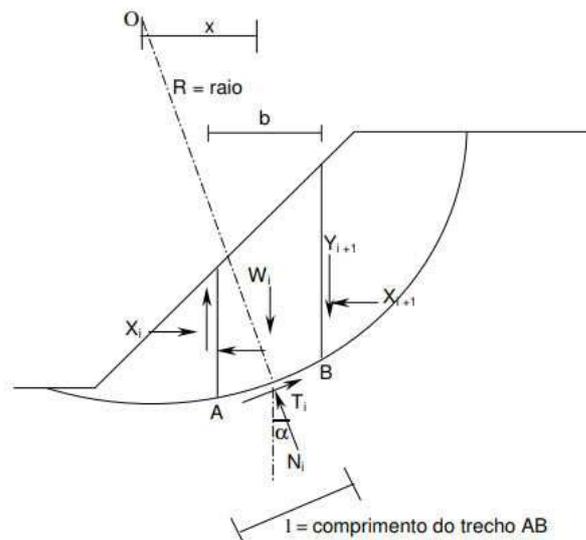
As equações da “Mecânica dos Sólidos” são utilizadas para a verificação do equilíbrio da porção de solo situada acima desta superfície de deslizamento. As forças participantes são as causadoras do deslizamento e as resistivas (MARANGON, 2013).

Métodos que seguem a teoria do estado limite podem ser divididos em três subgrupos: que consideram a massa rompida como um corpo único, que dividem a massa em cunhas e métodos que dividem a massa rompida em fatias ou lâminas.

2.6.1 O Método de Bishop Simplificado

O método de Bishop Simplificado (1955) é baseado em equilíbrio limite e considera que o maciço deslocado é dividido em fatias e a superfície de ruptura possui forma circular, como pode ser observado na Figura 27.

Figura 27- Forças atuantes em uma fatia de solo



Fonte: Fabrício (2006)

Assume-se a hipótese de que a resultante das forças entre as fatias é horizontal e calcula-se o fator de segurança por meio de equilíbrio de forças verticais e momentos. O fator de segurança (FS) é dado pela equação 3.

$$FS = \frac{1}{\sum W \operatorname{sen} \alpha} \sum \frac{c' b + (W - ub) \operatorname{tg} \varphi'}{m_\alpha} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$$m_\alpha = \cos \alpha \left[1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi'}{FS_i} \right] \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

W = peso da fatia

b = espessura da fatia

c' = coesão do solo

φ = ângulo de atrito do solo

u = poropressão

A solução resulta de um processo iterativo, no qual é arbitrado o valor de FS_i da segunda equação, e calcula-se o fator FS, da primeira equação. O processo se repete até que ambos os valores sejam iguais.

Os estudos realizados em aterros sanitários que já sofreram acidentes mostram a tendência que esses corpos têm de romper segundo uma forma circular. Dessa forma, escolheu-se usar a teoria de Bishop Simplificado, já que essa hipótese é adotada nesse método.

3 Material e Métodos

Nesse capítulo, são apresentadas as metodologias adotadas para a obtenção dos parâmetros de resistência dos RSU, utilizando um equipamento de grandes dimensões desenvolvido por Ribeiro (2007), com algumas modificações.

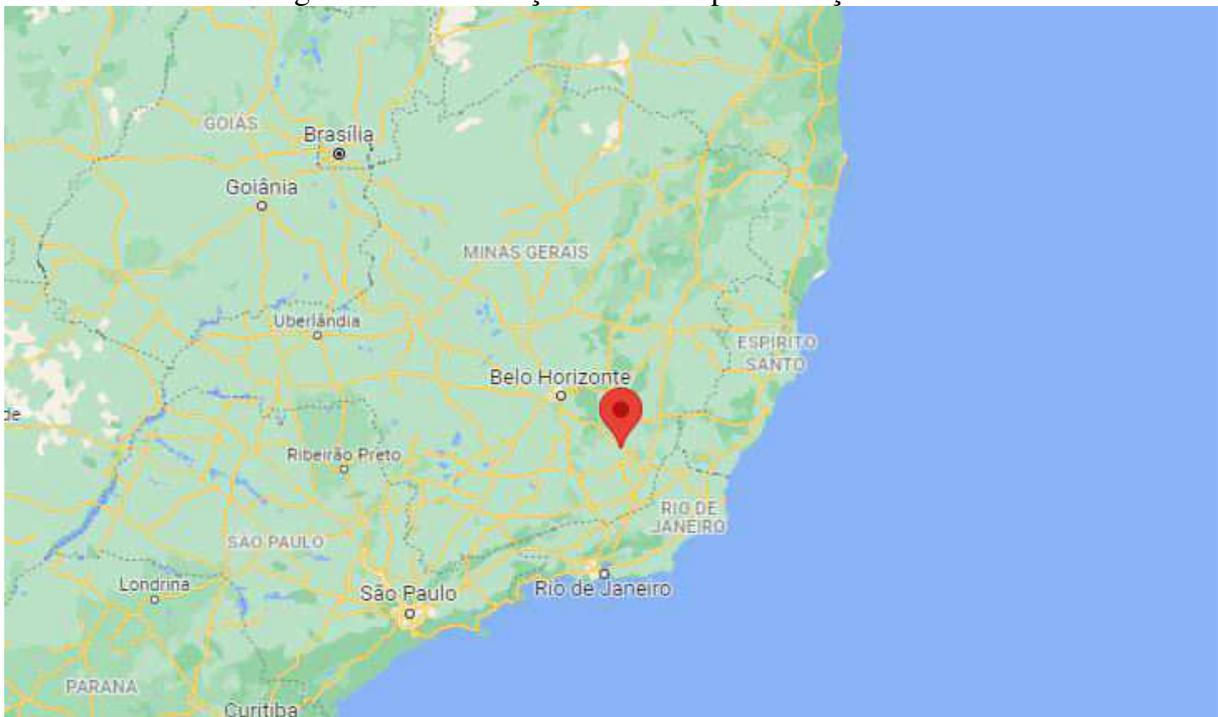
A seguir, são descritos os procedimentos utilizados nos ensaios para a preparação das amostras, os equipamentos e as metodologias, bem como os cálculos usados para a obtenção dos parâmetros de resistência dos RSU.

3.1 Material

Para a realização dos ensaios de resistência de RSU em laboratório, foram usados RSU da cidade de Viçosa, situada em Minas Gerais (Figura 28). A cidade de Viçosa possui uma população estimada de 79.388 habitantes (IBGE, 2020) e uma área de 299.418 km² (IBGE, 2020). Os resíduos foram obtidos de cinco bairros diferentes do município sendo eles o Bairro de Fátima, Centro, Nova Viçosa, Santo Antônio e a área Rural da cidade, que podem ser observados na Figura 29.

Os bairros onde foram coletados os resíduos foram escolhidos visando abranger toda a cidade do ponto de vista socioeconômico, desta forma foram escolhidos um bairro residencial com baixo poder aquisitivo típico (Nova Viçosa), um bairro residencial com médio poder aquisitivo típico (Santo Antônio) e um bairro residencial com alto poder aquisitivo típico (Fátima), um bairro comercial típico (Centro) e a área Rural, conforme apresentado no mapa da Figura 30.

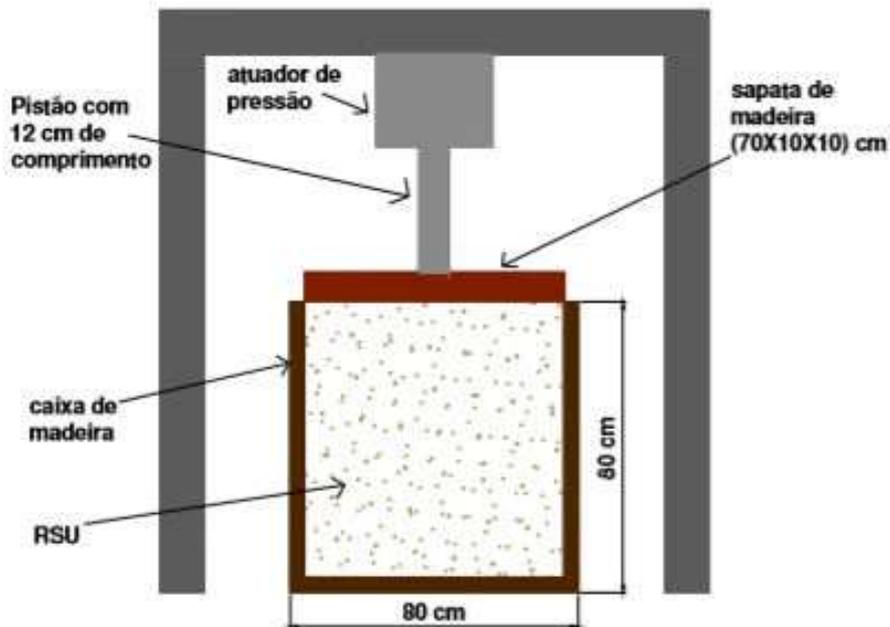
Figura 28 - Localização do município de Viçosa- MG



Fonte: Google (2021)

carga, que consiste, basicamente, num atuador de pressão com um pistão de 12 cm de curso, que aplica a carga nos RSU por meio de uma sapata rígida de madeira com 70 cm de comprimento por 10 cm de largura e 10 cm de altura, como pode ser observado na Figura 31.

Figura 31- Esquema do equipamento desenvolvido para realização da capacidade de carga em um talude de RSU.



Fonte: Ribeiro (2007)

A caixa é construída de tal forma que uma de suas paredes laterais é removível, de modo que, após a compactação dos resíduos e a retirada dessa parede, tenha-se um talude vertical de lixo.

No trabalho de Ribeiro (2007) o pistão era acionado por meio de da aplicação de uma pressão de ar regulada por uma válvula e por um manômetro. Além do desse sistema para regular a pressão, o equipamento incluía quatro válvulas que servia para aplicação e liberação do ar no atuador de pressão, podendo-se assim realizar o carregamento e o descarregamento do ensaio.

Para monitorar os recalques dos resíduos, Ribeiro (2007) adaptou ao equipamento, dois relógios medidores de deslocamentos, com precisão de 0,01 mm, e capacidade de medir até 100 mm de deslocamento.

No presente trabalho, utilizou-se o equipamento desenvolvido por Ribeiro (2007) para avaliar a resistência dos RSU, mas com algumas adaptações.

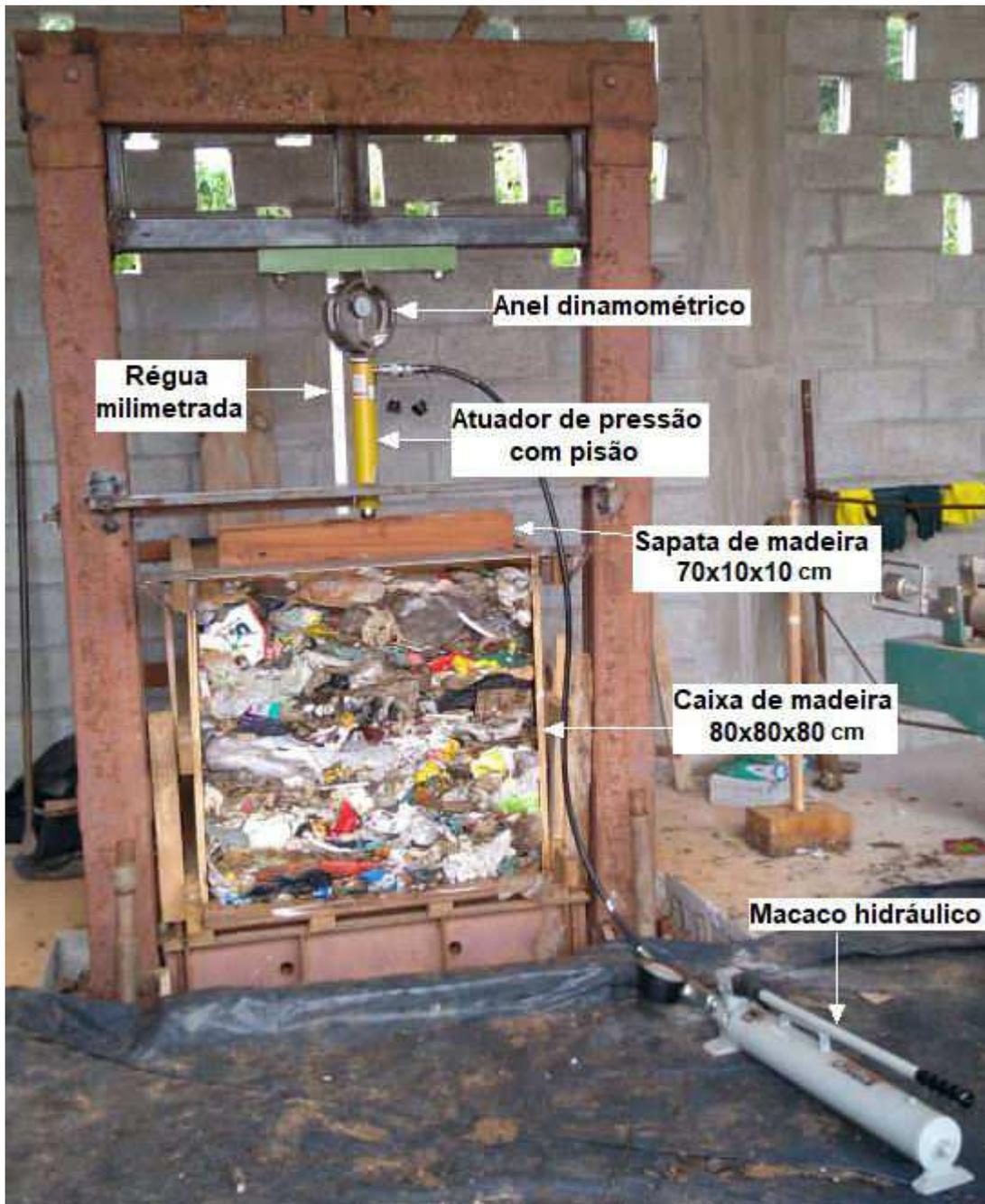
Uma mudança feita no equipamento original foi a utilização de um pistão com 27 cm de curso, devido aos deslocamentos finais dos resíduos terem apresentado valores maiores do que 12 cm, no geral.

Outra adaptação realizada foi a forma como o pistão de carga é acionado. Neste trabalho, o pistão é acionado por meio de da aplicação de pressão de óleo por meio de um macaco hidráulico. A pressão é regulada por meio de um anel dinamométrico que tem a constante $k=2,4154$ kgf/divisões.

Por fim, foi necessário fazer uma adaptação na forma de medir os deslocamentos verticais. Como os deslocamentos obtidos no presente trabalho foram maiores que 100 mm, foi utilizada uma régua milimetrada, fixada lateralmente no pórtico de reação, posicionada no centro da sapata e livre para deslocar verticalmente, com precisão de 1 mm e capacidade de 600 mm.

A vista geral do equipamento utilizado neste trabalho pode ser observada na Figura 32 e o detalhe da régua milimetrada utilizada para a medição dos deslocamentos verticais podem ser vistos na Figura 33.

Figura 32- Vista geral do equipamento para realização dos ensaios.



Fonte: Autor

Figura 33- Detalhe da régua milimetrada utilizada para a medição dos deslocamentos verticais



Fonte: Autor

3.4 Delineamento experimental

Este trabalho estudou a variação dos parâmetros de resistência dos RSU conforme a alteração do nível de compactação e, conseqüentemente, do peso específico, e do teor de plásticos moles na composição do resíduo.

Para estudar a variação do nível de compactação dos resíduos, o peso específico dos resíduos foi variado. Os ensaios foram feitos com o resíduo com baixa compactação (4 kN/m³), com média a baixa compactação (5 kN/m³), com compactação média (6 kN/m³) e com compactação média a alta (7 kN/m³).

Para o estudo da variação dos parâmetros de resistência com a quantidade de plásticos moles presentes foram feitos os ensaios sem presença de plásticos (0%), e com a presença de plásticos em 3% e 6% da composição de resíduos, em peso. Para estes ensaios, os resíduos foram compactados buscando o peso específico de 7 kN/m³. A nomenclatura dada a cada

ensaio com seu respectivo peso específico e teor de plásticos moles estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8- Delineamento experimental

Nomenclatura	Peso específico (kN/m ³)	Teor de Plásticos Moles (%)
PE4	4 kN/m ³	Natural (11,2 %)
PE5	5 kN/m ³	Natural (11,2 %)
PE6	6 kN/m ³	Natural (11,2 %)
PE7	7 kN/m ³	Natural (11,2 %)
PM0	7 kN/m ³	0 %
PM3	7 kN/m ³	3 %
PM6	7 kN/m ³	6 %

Fonte: Autor

Ao todo foram realizados 23 ensaios, já que para cada variação de peso específico ou de teor de plásticos moles, foram feitas 3 repetições, exceto para os pesos específicos de 6 kN/m³ e 7 kN/m³, que tiveram 4 repetições devido à variação dos resultados obtidos.

3.4 Procedimentos metodológicos

3.3.1 Caracterização dos Resíduos

Inicialmente foi realizada a caracterização dos resíduos obtidos da cidade de Viçosa. Essa caracterização foi feita por meio da determinação da composição gravimétrica dos resíduos.

Para tal procedimento, inicialmente, foi feita a coleta e o armazenamento dos resíduos em caçambas com capacidade volumétrica de 5 m³, durante 4 dias da semana. Após esse período, as caçambas foram pesadas e levadas para o Laboratório de Mecânica dos Resíduos, onde se realizaram o quarteamento do material e, depois, a separação das frações do resíduo. Na Tabela 9 pode ser observado o peso total das amostras totais coletadas em cada bairro.

Tabela 9- Peso das amostras totais

Bairro	Santo Antônio	Rural	Fátima	Centro	Nova Viçosa	Média
Peso (kg)	1096	736	872	780	752	847,2

Fonte: Autor

O quarteamento dos resíduos foi realizado seguindo as recomendações da NBR 10007 da ABNT (2004) - Amostragem de resíduos sólidos: o conteúdo da caçamba foi despejado em cima de uma lona plástica de 6x8 m disposta no solo. Os sacos e as sacolas plásticas foram abertos e os resíduos foram despejados na lona (Figura 34) e procedeu-se a homogeneização da amostra, com ajuda de uma enxada (Figura 35). Posteriormente, separou-se a amostra em quatro partes aparentemente iguais (Figura 36) e descartaram-se duas partes opostas em diagonal (Figura 37). Novamente, homogeneizou-se o restante da amostra, separou-se em quatro partes iguais e descartaram-se duas partes opostas em diagonal. O restante da amostra foi usada para fazer a caracterização dos resíduos.

Figura 34- Processo de quarteamento - abertura dos sacos e sacolas



Fonte: Autor

Figura 35- Processo de quarteamento - homogeneização do resíduo



Fonte: Autor

Figura 36- Processo de quarteamento - separação em quatro partes iguais



Fonte: autor

Figura 37- Processo de quarteamento - amostra restante após descarte de metade da amostra inicial



Fonte: autor

No presente estudo foram adotados os seguintes componentes no ensaio de gravimetria:

Matéria orgânica: Restos alimentares, cascas de legumes e frutas;

Poda: Flores, podas de árvores, grama;

Plástico mole: Sacos, sacolas, látex, sacos de rafia;

Plástico duro: embalagens de refrigerantes e água, recipientes de produtos de limpeza, utensílios de cozinha;

Isopor;

Papel e papelão: Caixas, revistas, jornais, cartões, papel, cadernos, livros, pastas, embalagens longa vida;

Vidro: Copos, garrafas de bebidas, pratos, espelho, embalagens de produtos de limpeza, embalagens de produtos de beleza, embalagens de produtos alimentícios;

Metais ferrosos: Palha de aço, alfinetes, agulhas, embalagens de produtos alimentícios;

Metal não ferroso: Latas de bebidas, restos de cobre, restos de chumbo, fiação elétrica;

Pedra, solo, louça e cerâmica: Vasos de flores, pratos, xícaras, restos de construção, solo, tijolos, cascalho, pedras decorativas;

Madeira: Caixas, tábuas, palitos de fósforo, palitos de picolé, tampas, móveis, lenha;

Borracha e couro: Bolsas de couro, mochilas, sapatos, tapetes, luvas, látex, cintos, balões;

Têxtil: Aparas, roupas, panos de limpeza, pedaços de tecido, bolsas de pano;

Contaminante biológico: Papel higiênico, cotonetes, algodão, curativos, gases e panos com sangue, fraldas descartáveis, absorventes higiênicos, seringas, lâminas de barbear, cabelos, pelos, embalagens de anestésicos, luvas;

Contaminante químico: Pilhas, baterias, medicamentos, lâmpadas, inseticidas, raticida, colas em geral, cosméticos, vidros de esmaltes, embalagens de produtos químicos, latas de óleo de motor, latas com tintas, embalagens pressurizadas, canetas com carga, papel carbono, filme fotográfico;

Equipamentos eletrônicos: Computadores, laptops, celulares, rádios, liquidificadores, mouses, teclados;

Diversos: Velas de cera, restos de sabão e sabonete, carvão, giz, pontas de cigarro, rolhas, cartões de crédito, lápis de cera, embalagens metalizadas, sacos de aspirador de pó, lixas e outros materiais de difícil identificação.

Para fazer a caracterização dos resíduos, a amostra foi levada para uma mesa de triagem (Figuras 38 e 39), os resíduos foram separados, ensacados e posteriormente pesados.

Figura 38- Caracterização dos resíduos na mesa de triagem



Fonte: Autor

Figura 39- Caracterização dos resíduos na mesa de triagem



Fonte: Autor

3.3.2 Determinação da umidade da amostra

Para a determinação da umidade do RSU foi retirada uma amostra de aproximadamente 2 kg do centro da caixa, quando os ensaios foram finalizados. A amostra foi levada para uma estufa com temperatura média de 65 °C até que atingisse peso constante.

Para que o restante do RSU não tivesse a umidade modificada ao longo do tempo, os resíduos foram mantidos cobertos com lona plástica, protegidos do sol e chuva.

3.3.3 Procedimentos utilizados nos ensaios

Todos os ensaios foram realizados seguindo as etapas descritas a seguir.

- Homogeneização da amostra:

Com a quantidade de resíduos necessária para cada ensaio, era feito o processo de homogeneização da amostra antes de compactar o RSU na caixa. Para isso os sacos e sacolas plásticas foram abertos e os resíduos foram despejados na lona e procedeu-se a homogeneização da amostra, com ajuda de uma enxada

- Compactação dos RSU na caixa de madeira:

Nessa etapa, os resíduos foram compactados na caixa, de modo a alcançar o peso específico necessário para cada ensaio. Para facilitar a compactação, a caixa foi demarcada em 5 camadas, com 15 cm de altura cada uma (Figura 40). Em cada camada, eram compactados 38,4 kg de RSU para atingir o peso específico de 4 kN/m³, 48 kg de RSU para atingir o peso específico de 5 kN/m³, 57,6 kg de RSU para atingir o peso específico de 6 kN/m³ e 67,2 kg de RSU para atingir o peso específico de 7 kN/m³, como pode ser visto na Figura 41. Após a última camada, os resíduos eram cobertos com uma fina camada de areia, para evitar a presença de vetores e de mau cheiro.

Figura 40- Demarcação da caixa em faixas de 15 cm



Fonte: Autor

Figura 41- Compactação do resíduo nas camadas



Fonte: Autor

- Aplicação das cargas:

Após a compactação dos resíduos, posicionavam-se a peça rígida de madeira (sapata), o atuador de pressão e a régua milimetrada, retirava-se a parede removível e iniciava-se a etapa de carregamento vertical da amostra de RSU (Figura 31). Para facilitar a ruptura, a sapata era posicionada na extremidade do talude. Os estágios de carregamento eram feitos de 10 em 10 minutos, medindo-se o recalque obtido no final de cada estágio. Para o resíduo com baixa compactação (4 kN/m^3) os acréscimos de tensão foram feitos a cada 5 divisões marcadas no anel dinamométrico, como a constante do anel é $k=2,4154 \text{ kgf/divisões}$, é o equivalente a aproximadamente $1,7 \text{ kPa}$. No restante dos ensaios os acréscimos de tensão foram feitos a cada 20 divisões marcadas no anel dinamométrico, que é o equivalente a aproximadamente $6,9 \text{ kPa}$. Nos estágios finais, os acréscimos de tensão eram menores para definir melhor a tensão de ruptura.

- Leitura dos deslocamentos:

Como descrito no item 3.2, os deslocamentos verticais eram medidos por meio de uma régua milimetrada posicionada no centro da sapata. Os recalques eram monitorados durante o carregamento e a leitura do deslocamento era feita no final de cada estágio de carregamento, ou seja, depois de 10 minutos.

Nos primeiros ensaios, variou-se somente o peso específico do RSU, portando não havia necessidade de mudar nenhuma característica do resíduo. A partir do momento que passou a se avaliar a presença de plásticos moles no RSU, houve a necessidade de manipular as características do resíduo. Para isso, inicialmente foi retirado todo o plástico mole presente na amostra fazendo assim os ensaios com o teor de plásticos moles em 0%. Após isso, acrescentou-se 2 kg de plásticos moles por camada de 15 cm para que atingisse o teor de 3%. Em seguida, adicionou-se novamente 2 kg de plásticos moles por camada de 15 cm para que atingisse o total de 4 kg por camada e o teor de 6%.

Em todos os ensaios foi possível definir uma tensão de ruptura. Essa tensão pôde ser observada, pois havia uma queda brusca da pressão registrada no relógio do anel dinamométrico no momento em que havia o rompimento do talude, mostrando que o material não suportava mais aqueles níveis de tensão.

Também foi possível observar durante os ensaios o aparecimento de trincas na areia que cobria os resíduos, indicando o início da ruptura, desprendimento dos resíduos da parede da caixa oposta ao talude (Figura 42) e o deslocamento da sapata no sentido da superfície de ruptura (Figura 43).

Figura 42- Desprendimento dos resíduos da parede da caixa oposta ao talude



Fonte: Autor

Figura 43- Deslocamento da sapata no sentido da superfície de ruptura



Fonte: Autor

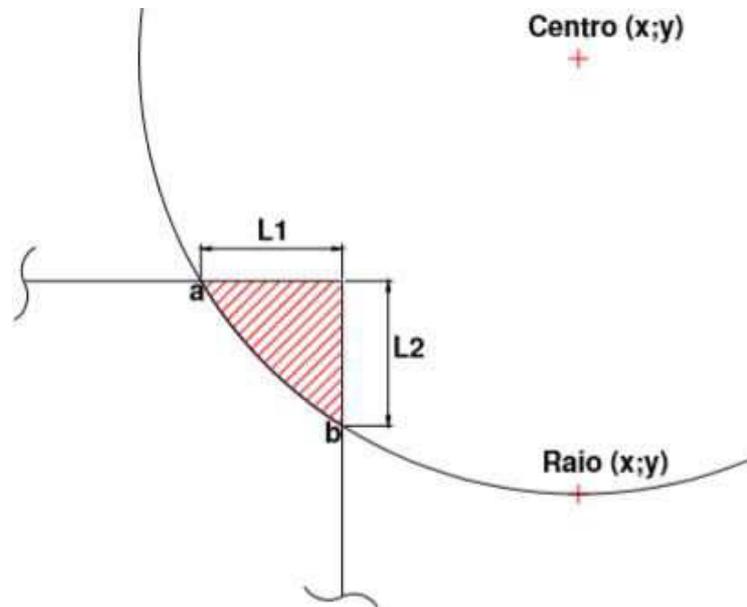
3.4 Cálculo dos parâmetros de resistência

Para estimar os parâmetros de resistência foi realizada retroanálise da superfície de ruptura usando-se o método de equilíbrio limite de Bishop Simplificado e o *software* SLIDE 2D, da Rocscience, versão 9. A carga de ruptura aplicada pela sapata foi inserida na análise como uma sobrecarga uniformemente distribuída na superfície do talude de RSU.

A partir dessas premissas, foi arbitrado um valor para a coesão e foi determinado o valor do ângulo de atrito correspondente ao fator de segurança $FS=1$ para a superfície de ruptura observada no ensaio, quando a sobrecarga for máxima (ruptura).

Para a representação da superfície de ruptura, após cada ensaio, foi medida a superfície de ruptura como mostra a Figura 44, por meio de dois comprimentos $L1$ e $L2$. Em seguida, foi obtida as coordenadas do centro e o raio do círculo que passa pelos pontos a e b indicados na Figura 44.

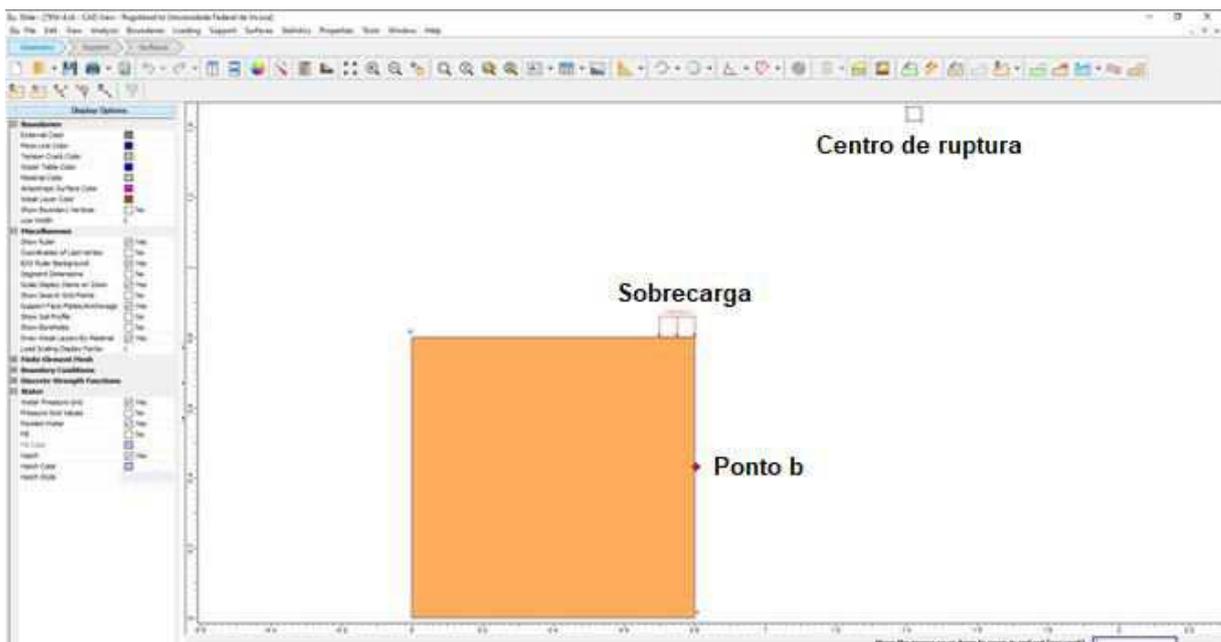
Figura 44- Esquema para calcular a superfície de ruptura



Fonte: Ribeiro (2007)

No programa SLIDE, foi representado o talude de resíduo, especificando-se, além das coordenadas do centro e o ponto de ruptura b, o valor da tensão de ruptura representada por uma sobrecarga uniformemente distribuída nos 10 cm de largura da sapata (Figura 45).

Figura 45- Especificação das coordenadas de centro de ruptura, do ponto b e da sobrecarga no programa SLIDE



Fonte: Autor

Nas retroanálises foram arbitrados os valores de coesão, variando de 0,25 em 0,25 kPa e foi determinado, por meio análise de sensibilidade estatística, o valor do ângulo de atrito, para cada valor de coesão arbitrada, de modo que o fator de segurança (FS) pelo método de Bishop Simplificado, seja igual a 1.

4 Resultados e discussões

Nesse capítulo, apresentam-se inicialmente, as características das amostras ensaiadas. Em seguida, são apresentados e discutidos, os resultados obtidos nos ensaios de estabilidade de talude.

4.1 Características das amostras ensaiadas

Os resultados da caracterização ou da composição gravimétrica dos resíduos dos bairros de Viçosa e a média podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10- Composição gravimétrica do RSU de Viçosa

Material	St Antônio		Rural		Fátima		Centro		Nova Viçosa		Média			
	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Peso (kg)	%	Agrupamentos	%
Orgânico	88,6	51,6	134,0	40,7	109,4	46,1	80,1	44,1	86,2	40,8	99,7	44,1	Compostável	44,5
Poda	1,7	1,0	0,9	0,3	0,7	0,3	0,8	0,4	0,9	0,4	1,0	0,4		
Plástico mole	18,0	10,5	28,6	8,7	28,7	12,1	24,5	13,5	26,9	12,7	25,3	11,2	Reciclável	27,9
Plástico duro	8,6	5,0	11,4	3,5	9,8	4,1	8,2	4,5	11,7	5,5	9,9	4,4		
Isopor	0,8	0,4	1,5	0,5	1,7	0,7	1,9	1,1	1,2	0,5	1,4	0,6		
Papel e papelão	19,4	11,3	14,7	4,5	19,3	8,1	22,9	12,6	15,9	7,5	18,4	8,2		
Vidro	5,8	3,4	5,9	1,8	4,9	2,0	6,8	3,7	4,1	1,9	5,5	2,4		
Metal ferroso	0,9	0,5	1,2	0,4	1,3	0,6	1,0	0,5	1,9	0,9	1,3	0,6		
Metal não ferroso	2,2	1,3	1,0	0,3	1,0	0,4	1,4	0,8	0,4	0,2	1,2	0,5		
Pedra, terra, louça e cerâmica	0,2	0,1	0,6	0,2	0,8	0,3	5,6	3,1	0,7	0,3	1,6	0,7	Reaproveitável	4,3
Madeira	0,0	0,0	0,6	0,2	0,8	0,3	1,1	0,6	0,4	0,2	0,6	0,3		
Couro e borracha	3,0	1,7	0,0	0,0	2,1	0,9	1,1	0,6	2,4	1,1	1,7	0,8		
Têxtil	4,4	2,5	7,1	2,1	5,1	2,1	1,7	0,9	9,0	4,3	5,4	2,4		
Contaminante químico	0,2	0,1	0,4	0,1	0,7	0,3	0,0	0,0	0,3	0,1	0,3	0,1		
Equipamento eletrônico	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,0	Rejeito	23,3
Contaminante biológico	17,6	10,3	120,7	36,7	50,8	21,4	24,6	13,5	49,0	23,2	52,5	23,2		
Diversos	0,0	0,0	0,6	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,1	Total	100
Total	171,6	100,0	329,2	100,0	237,2	100,0	181,6	100,0	211,1	100,0	226,1	100,0		

Segundo a Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do Estado de Minas Gerais de 2017, realizada pelo Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos o teor de material compostável é de 44,82%, o de reciclável é de 30,17% o de reaproveitável é de 9,88% e de rejeitos é 15,13%, como pode ser observado na Figura 46.

Figura 46- Composição gravimétrica do RSU de Minas Gerais

Categoria do resíduo	Composição gravimétrica (%)	Agrupamentos	Proporção por destinação ou disposição final (%)
Resto de comida	39,24	Compostáveis	44,82
Poda	5,58		
Plástico	13,58	Recicláveis	30,17
Papel e papelão	11,52		
Vidro	2,66		
Metal ferroso	1,31		
Metal não-ferroso	1,08		
Pedra, terra, louça e cerâmica	3,05	Reaproveitáveis	9,88
Madeira	0,88		
Couro e borracha	1,06		
Têxtil	3,38		
Contaminante químico	0,87		
Equipamento eletroeletrônico	0,64	Rejeito	15,13
Contaminante biológico	11,69		
Diversos	3,44		
Total	100	Total	100

Fonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente (2017)

Pode-se observar que os resultados encontrados na gravimetria das amostras de Viçosa apresentam coerência com o cenário estadual, em relação aos teores de materiais compostáveis e recicláveis gerados. O teor de rejeitos nos resíduos do município se mostrou maior se comparado ao cenário estadual. Já a quantidade de material reaproveitável no resíduo da cidade apresentou-se em menor concentração do que no panorama do estado.

Os resíduos utilizados no estudo de Ribeiro (2007) também eram da cidade de Viçosa e por isso é interessante fazer um comparativo nas mudanças das características dos resíduos 14 anos depois. Os resultados encontrados por Ribeiro (2007) podem ser vistos na Tabela 11.

Tabela 11- Composição gravimétrica dos RSU de Viçosa (2007)

Material	Peso total (Kg)	% em Peso
Matéria orgânica*	182,7	60,5
Papel e Papelão	37,9	12,5
Plásticos	39,8	13,2
Vidros	6,1	2,0
Alumínio	3,0	1,0
Metais Ferrosos	2,9	1,0
Borracha e Couro	2,7	0,9
Madeira	2,0	0,7
Trapo	8,9	2,9
Outros**	16,1	5,3
Total	302,1	100,0

*Restos de alimentos (frutas, verduras, folhas etc.); **Materiais de difícil classificação

Fonte: Ribeiro (2007)

É notável que houve uma mudança considerável no descarte de resíduo da população da cidade de Viçosa, tendo uma redução na produção de matéria orgânica de 60,48% para 45%, um aumento no consumo de plásticos de 13,17% para 16% e uma diminuição no descarte de papel e papelão de 12,55% para 8%.

Foi calculada a umidade (w) de duas amostras de RSU, na base úmida, e como resultado a Amostra 1 apresentou um teor de água de 48% e a Amostra 2, um teor de 51%.

4.2 Ensaio de estabilidade de talude

Os resultados encontrados nos ensaios realizados na caixa de madeira, simulando um talude de lixo, foram divididos em dois itens. No primeiro são tratados os ensaios realizados com a variação da compactação dos RSU. No segundo, tratam-se os ensaios realizados com peso

específico dos resíduos igual a 7 kN/m^3 , variando o teor de plásticos moles presentes no resíduo.

4.2.1 Variação da compactação dos RSU

4.2.1.1 Ensaio com peso específico igual a 4 kN/m^3

Na Tabela 12 podem-se observar os comprimentos L1 (horizontal) e L2 (vertical) medidos que representam os pontos por onde passa a superfície de ruptura e nas Figuras 48, 49 e 50 pode-se ver os detalhes das rupturas para os ensaios denominados PE4, numerados como 1, 2 e 3 com peso específico de 4 kN/m^3 .

Tabela 12 - Comprimentos L1 e L2 medidos (PE4 - 4 kN/m^3)

Nomenclatura	Ensaio	L1 – horizontal (cm)	L2 – vertical (cm)
PE4	1	20,0	24,2
PE4	2	24,8	36,7
PE4	3	37,0	39,4

Fonte: Autor

Figura 47- Detalhe da ruptura do Ensaio 1 (PE4 - 4 kN/m^3)



Fonte: Autor

Figura 48- Detalhe da ruptura do Ensaio 2 (PE4 - 4kN/m³)

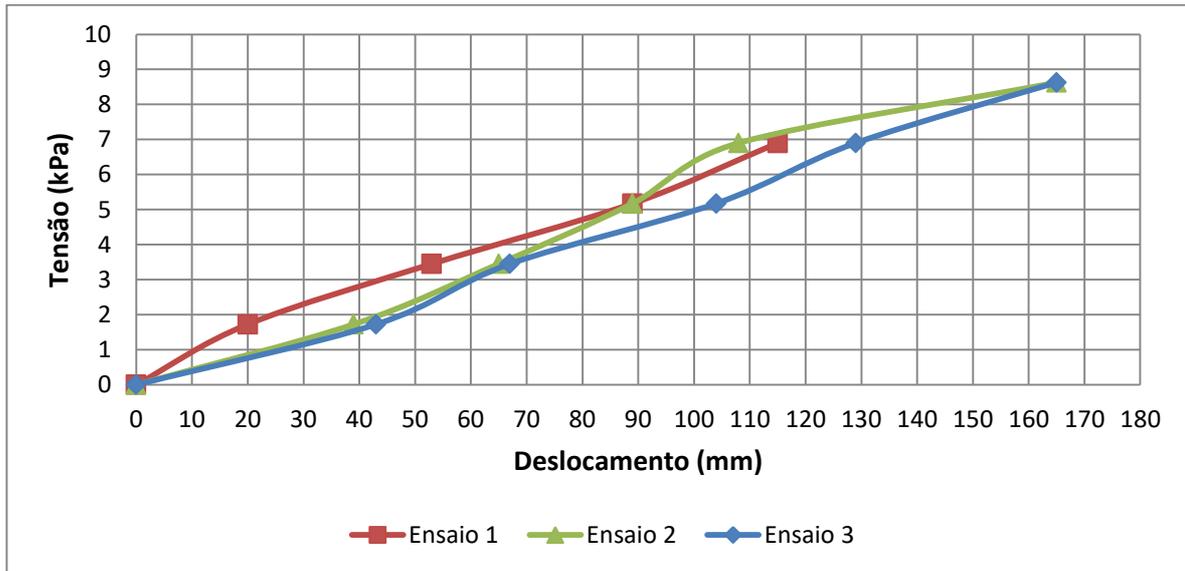
Fonte: Autor

Figura 49- Detalhe da ruptura do Ensaio 3 (PE4 - 4kN/m³)

Fonte: Autor

Nota-se que não houve um padrão de comportamento quanto à geometria da superfície que se formou entre os ensaios 1, 2 e 3 e nenhuma relação entre o comprimento L1 e L2. Nas Figuras é possível observar o desprendimento do resíduo da lateral da caixa oposta ao talude, o que confirma a hipótese de alguns componentes contidos no lixo funcionarem como se fossem fibras.

Na Figura 51 apresenta-se as curvas tensão *versus* deslocamento vertical obtidas nos ensaios 1, 2 e 3, com o peso específico de 4kN/m³.

Figura 50- Curvas tensão *versus* deslocamento (PE4 - 4kN/m³)

Fonte: Autor

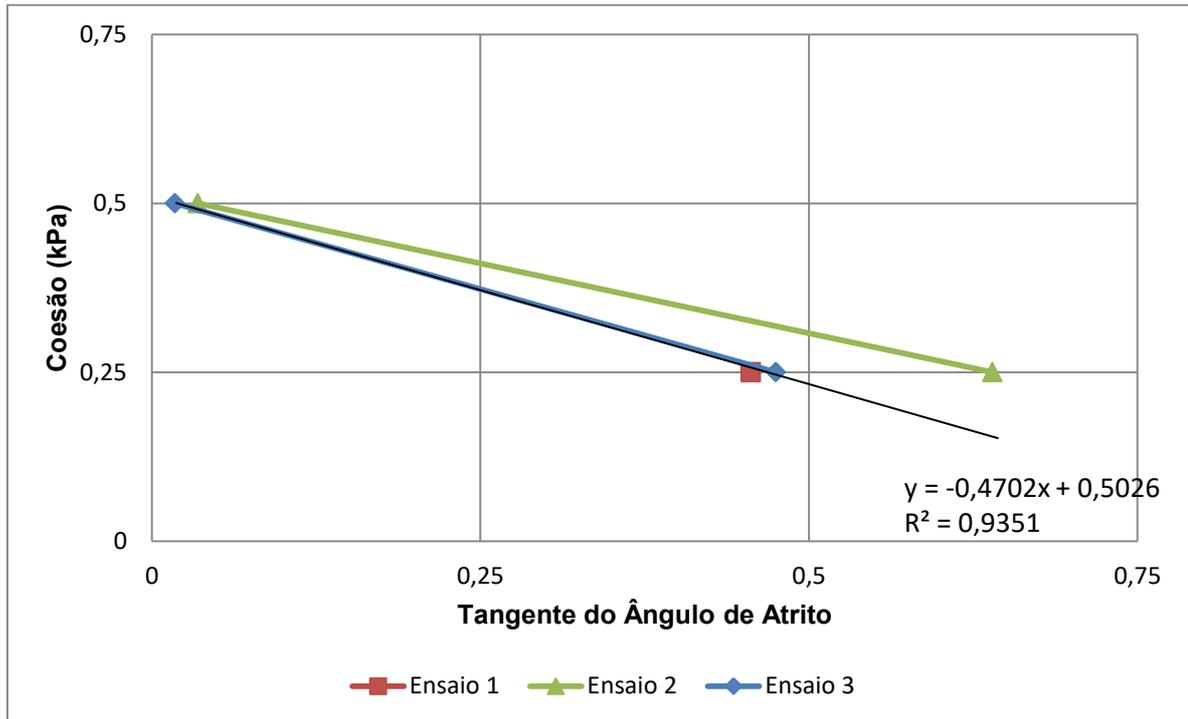
Pode-se observar que dos três ensaios, as amostras dos ensaios 2 e 3 apresentaram tensões de ruptura e deslocamentos iguais, atingindo valores de 8,6 kPa para a tensão de ruptura e 165 mm para o deslocamento vertical. A amostra do ensaio 1 apresentou uma tensão de ruptura reduzida se comparado aos ensaios 2 e 3, chegando ao valor de 6,9 kPa para a tensão de ruptura, o que representa uma redução de 20% do valor. O deslocamento final da amostra do ensaio 1 foi de 115 mm, sendo 30% menor do que os valores atingidos pelos ensaios 2 e 3.

Na Tabela 13 são apresentados os valores de coesão e ângulo de atrito obtidos por retroanálises, conforme descrito no item 4.4, e na Figura 52 são apresentadas as curvas coesão *versus* tangente do ângulo de atrito e a linha de tendência obtida dos três ensaios.

Tabela 13- Parâmetros de resistência obtidos para PE4 - 4kN/m³

Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
0,25	24,5	32,6	25,4
0,5	-	2,0	1

Fonte: Autor

Figura 51- Regressão entre Coesão e Tangente do Ângulo de Atrito (PE4 - 4kN/m³)

Fonte: Autor

Pode-se observar na Tabela 13 que apesar de no ensaio 1 a tensão de ruptura obtida ter sido menor, para a coesão de 0,25 kPa, os valores de ângulo de atrito obtidos no ensaio 3 e no ensaio 1 foram bem próximos. Já no ensaio 2 o resultado encontrado foi relativamente maior para a coesão de 0,25 kPa, mesmo que a sua tensão de ruptura tenha sido igual a do ensaio 3, mostrando que a geometria da superfície de ruptura interfere diretamente na obtenção desses parâmetros durante a retroanálise, além do valor da sobrecarga.

Para o ensaio 1, não encontrou-se resultados que apresentasse fator de segurança igual 1 para o valor de coesão igual a 0,5 kPa, todas as combinações de ângulo de atrito para esse valor de coesão apresentavam $FS > 1$. Nas retroanálises dos ensaios 2 e 3, encontrou-se valores de ângulo de atrito bem próximos para a coesão de 0,5 kPa, como pode ser visto no gráfico da Figura 51.

Não foram encontrados parâmetros de resistência que apresentassem fator de segurança igual 1 para valores de coesão acima de 0,5 kPa, todas as combinações acima desse valor de coesão apresentavam $FS > 1$.

Ao traçar a linha de tendência que passa pelos pontos de coesão e tangente do ângulo de atrito dos valores obtidos nas retroanálises dos três ensaios, o coeficiente de determinação alcançado é de $R^2=0,9351$. Nessa reta, para a coesão de 0,25 kPa o ângulo de atrito encontrado seria $28,2^\circ$ e para a coesão de 0,5 kPa o ângulo de atrito seria de $0,3^\circ$.

4.2.1.2 Ensaio com peso específico igual a 5kN/m^3

Na Tabela 14 pode-se observar os comprimentos L1 (horizontal) e L2 (vertical) medidos que representam os pontos por onde passa a superfície de ruptura e nas Figuras 53, 54 e 55 pode-se ver os detalhes da rupturas para os ensaios denominados PE5, numerados como Ensaio 4, 5 e 6, com peso específico de 5kN/m^3 .

Tabela 14- Comprimentos L1 e L2 medidos (PE5 - 5kN/m^3)

Nomenclatura	Ensaio	L1 – horizontal (cm)	L2 – vertical (cm)
PE5	4	39,9	39,9
PE5	5	34,4	33,2
PE5	6	37,6	34,5

Fonte: Autor

Figura 52- Detalhe da ruptura do Ensaio 4 (PE5 - 5kN/m^3)



Fonte: Autor

Figura 53- Detalhe da ruptura do Ensaio 5 (PE5 - 5kN/m³)

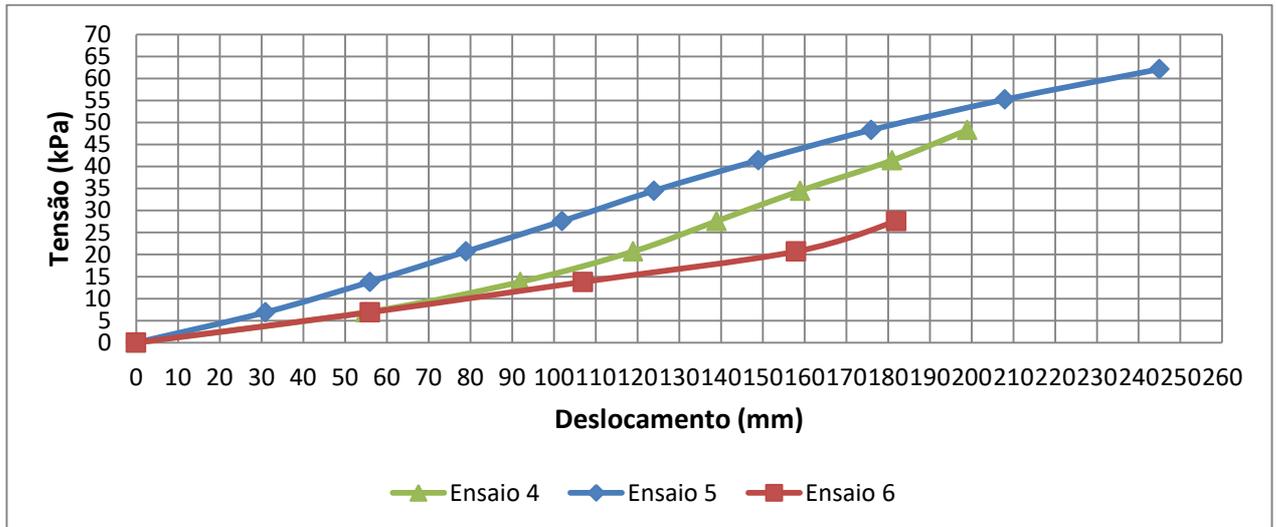
Fonte: Autor

Figura 54- Detalhe da ruptura do Ensaio 6 (PE5 - 5kN/m³)

Fonte: Autor

Desta vez é possível notar que houve uma certa relação entre o comprimento L1 e L2, que apresentaram valores mais próximos, sendo até mesmo iguais no ensaio 4. Também é evidente que as distâncias L1 e L2 variaram bem menos quando comparamos os ensaios 4, 5 e 6 entre si. Novamente é possível observar o desprendimento do resíduo da lateral da caixa oposta ao talude nas Figuras 53, 54 e 55, o que confirma a hipótese de alguns componentes contidos no lixo funcionarem como se fossem fibras.

Na Figura 56 apresenta-se as curvas tensão *versus* deslocamento vertical obtidas nos ensaios 4, 5 e 6, com o peso específico de 5kN/m³.

Figura 55- Curvas tensão *versus* deslocamento (PE5 - 5kN/m³)

Fonte: Autor

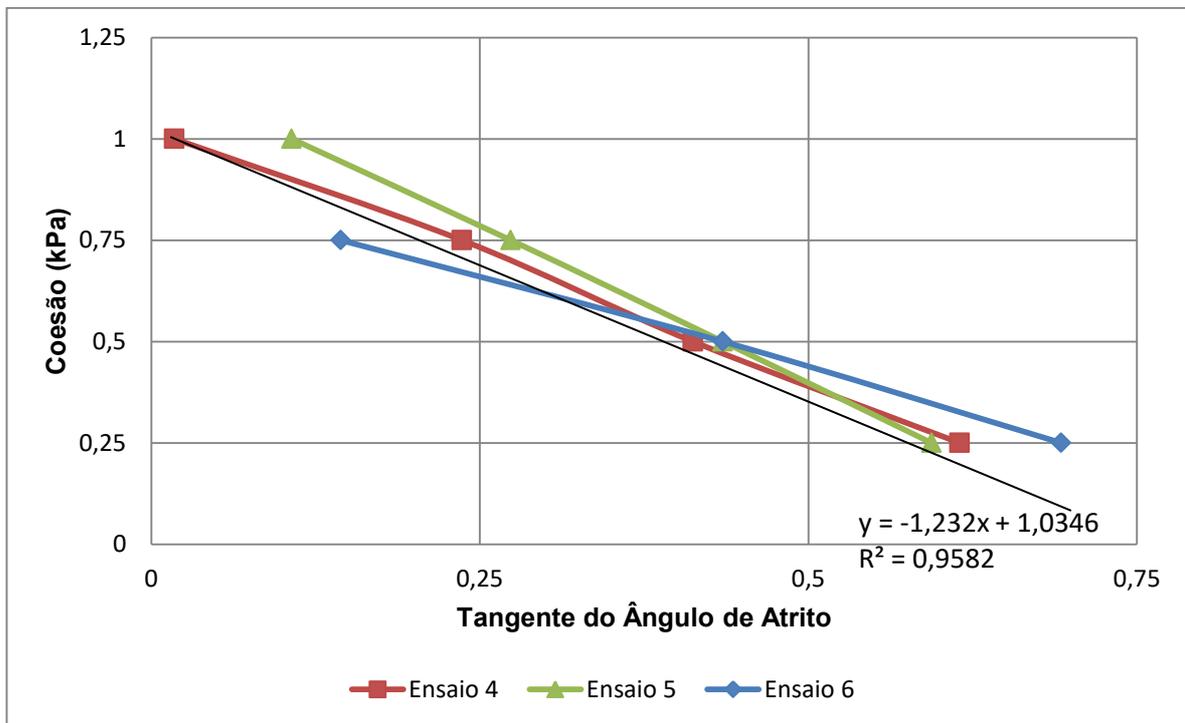
Pode-se observar que as três amostras apresentaram tensões de ruptura e deslocamentos diferentes. A amostra do Ensaio 4 apresentou uma tensão de ruptura de 48,3 kPa e deslocamento de 199 mm. A amostra do Ensaio 5 apresentou uma tensão de ruptura de 62,1 kPa e deslocamento de 245 mm. Já a amostra do Ensaio 6 apresentou uma tensão de ruptura de 27,6 kPa e deslocamento de 182 mm. Como as amostras apresentaram resultados diferentes, é interessante fazer uma média dos resultados. Dessa forma, a tensão de ruptura média possui o valor de 46 kPa, e o ensaio 4 apresenta uma tensão 5% maior do que a média, o ensaio 5 possui um valor 35% maior do que a média e o ensaio 6 exibe um valor 40% menor do que a média.

Na Tabela 15 são apresentados os valores de coesão e ângulo de atrito obtidos por retroanálises, conforme descrito no item 4.4, e na Figura 57 são apresentadas as curvas coesão *versus* tangente do ângulo de atrito e a linha de tendência obtida dos três ensaios.

Tabela 15- Parâmetros de resistência obtidos para PE5 - 5kN/m³

Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)		
	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6
0,25	31,6	30,7	34,7
0,50	22,4	23,5	23,5
0,75	13,3	15,3	8,2
1,00	1,0	6,1	-

Fonte: Autor

Figura 56- Regressão entre Coesão e Tangente do Ângulo de Atrito (PE5 - 5kN/m³)

Fonte: Autor

É possível observar na Tabela 15 que apesar de no ensaio 6 a tensão de ruptura obtida ter sido menor, para a coesão de 0,25 kPa e 0,5 kPa, os valores de ângulo de atrito obtidos são próximos aos dos ensaios 4 e 5, sendo até mesmo maior para a coesão de 0,25 kPa, mostrando novamente que além da sobrecarga, a geometria da superfície de ruptura interfere diretamente na obtenção desses parâmetros durante a retroanálise. Já para a coesão de 0,75 kPa o valor encontrado é menor para o ensaio 6 e não encontrou-se resultados que apresentasse fator de segurança igual 1 para o valor de coesão igual a 1 kPa, todas as combinações de ângulo de atrito para esse valor de coesão apresentavam $FS > 1$.

Nota-se que os valores encontrados para o ângulo de atrito nas retroanálises dos ensaios 4 e 5 são próximos, para a coesão de 0,25 kPa, 0,5 kPa e 0,75 kPa. Somente para a coesão de 1 kPa os valores de ângulo de atrito se distanciam mais.

Não foram encontrados parâmetros de resistência que apresentassem fator de segurança igual 1 para valores de coesão acima de 1 kPa, todas as combinações acima desse valor de coesão apresentavam $FS > 1$.

Ao traçar a linha de tendência que passa pelos pontos de coesão e tangente do ângulo de atrito dos valores obtidos nas retroanálises dos três ensaios, o coeficiente de determinação alcançado é de $R^2=0,9582$. Nessa reta, para a coesão de 0,25 kPa o ângulo de atrito encontrado seria 32,5°, para a coesão de 0,5 kPa o ângulo de atrito seria de 23,5°, para a coesão de 0,75 kPa o ângulo de atrito seria de 13,0° e para a coesão de 1,0 kPa o ângulo de atrito seria de 1,6°.

4.2.1.3 Ensaio com peso específico igual a 6kN/m³

Na Tabela 16 pode-se observar os comprimentos L1 (horizontal) e L2 (vertical) medidos que representam os pontos por onde passa a superfície de ruptura e nas Figuras 58, 59, 60 e 61 pode-se ver os detalhes da rupturas para os ensaios denominados PE6, numerados como Ensaios 7, 8, 9 e 10 com peso específico de 6 kN/m³.

Tabela 16- Comprimentos L1 e L2 medidos (PE6 - 7kN/m³)

Nomenclatura	Ensaio	L1 – horizontal (cm)	L2 – vertical (cm)
PE6	7	28,4	34,0
PE6	8	26,0	24,3
PE6	9	27,2	33,1
PE6	10	18,0	23,7

Fonte: Autor

Figura 57- Detalhe da ruptura do Ensaio 7 (PE6 - 6kN/m³)



Fonte: Autor

Figura 58- Detalhe da ruptura do Ensaio 8 (PE6 - 6kN/m³)



Fonte: Autor

Figura 59- Detalhe da ruptura do Ensaio 9 (PE6 - 6kN/m³)



Fonte: Autor

Figura 60- Detalhe da ruptura do Ensaio 10 (PE6 - 6kN/m³)



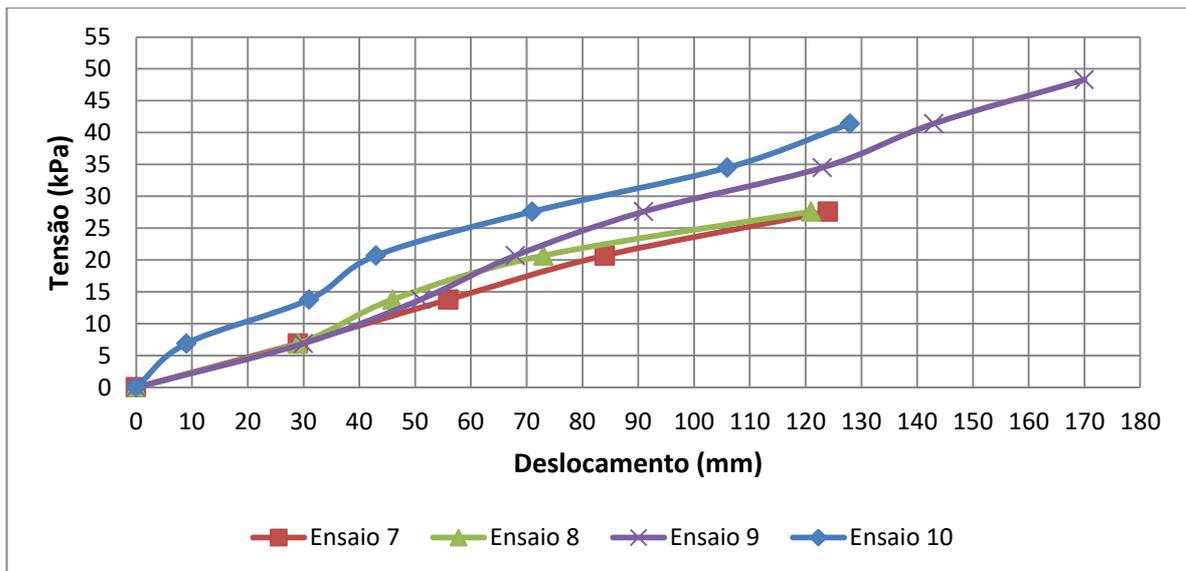
Fonte: Autor

Por meio de da Tabela 16 é possível observar que os comprimentos horizontais (L1) obtidos para os ensaios 7, 8 e 9 foram muito parecidos, somente a amostra do ensaio 10 apresentou

um valor para L1 mais baixo. Já para o comprimento vertical medido (L2) os ensaios 7 e 9 tiveram valores próximos, na ordem de 33 cm, e os valores encontrados nos ensaios 8 e 10 foram próximos entre si, na ordem de 24 cm, mas bem abaixo dos valores encontrados nos ensaios 7 e 9. Se formos analisar os valores L1 e L2 em conjunto, os ensaios 7 e 9 mantem um certo padrão, pois os as duas distâncias tem valores próximos. Do mesmo modo que nos ensaios anteriores, é possível observar o desprendimento do resíduo da lateral da caixa oposta ao talude nas Figuras 58, 59, 60 e 61, o que confirma a hipótese de alguns componentes contidos no lixo funcionarem como se fossem fibras

Na Figura 62 apresenta-se as curvas tensão *versus* deslocamento vertical obtidas nos ensaios 7, 8, 9 e 10, com o peso específico de kN/m^3 .

Figura 61- Curvas tensão *versus* deslocamento (PE6 - 6kN/m^3)



Fonte: Autor

Pode-se observar que dos quatro ensaios, as amostras dos ensaios 7 e 8 apresentaram tensões de ruptura iguais, atingindo valores de 27,6 kPa e os deslocamentos verticais foram de 124 mm para a amostra do ensaio 7 e 121 mm para a do ensaio 8. A amostra do ensaio 9 apresentou uma tensão de ruptura elevada se comparado aos ensaios 7 e 8, chegando ao valor de 48,3 kPa e um deslocamento de 170 mm. A amostra do ensaio 10 apresentou uma tensão de ruptura maior do que as encontradas nos ensaios 7 e 8, porém menor do que a do ensaio 9, chegando ao valor de 41,4 kPa e um deslocamento de 128 mm.

Durante a realização do ensaio 8, percebeu-se que o pistão estava aplicando a carga com um pouco de excentricidade em relação a sapata, e por isso acreditasse que as tensões de rupturas obtidas nos ensaios 7 e 8 foram tão baixas, já que a aplicação de carga de forma descentralizada poderia ajudar a sapata a tombar mais rapidamente. Ao corrigir o problema, atingiu-se tensões bem mais elevadas nos ensaios 9 e 10.

Assim, é coerente fazer o cálculo do valor da tensão média com e sem considerar os valores obtidos nos ensaios 7 e 8. Ao considerar todos os 4 valores de tensão de ruptura, a média será 36,2 kPa e os ensaios 7 e 8 possuem um valor de ruptura 24% menor do que a média, o ensaio 9 possui uma tensão de ruptura 33% acima da média e o ensaio 10 possui um valor 14% maior do que a média. Ao excluir os valores encontrados nos ensaios 7 e 8, a média será 44,9 kPa e o ensaio 9 terá uma tensão de ruptura 8% acima da média e o ensaio 10 uma tensão 8% abaixo da média.

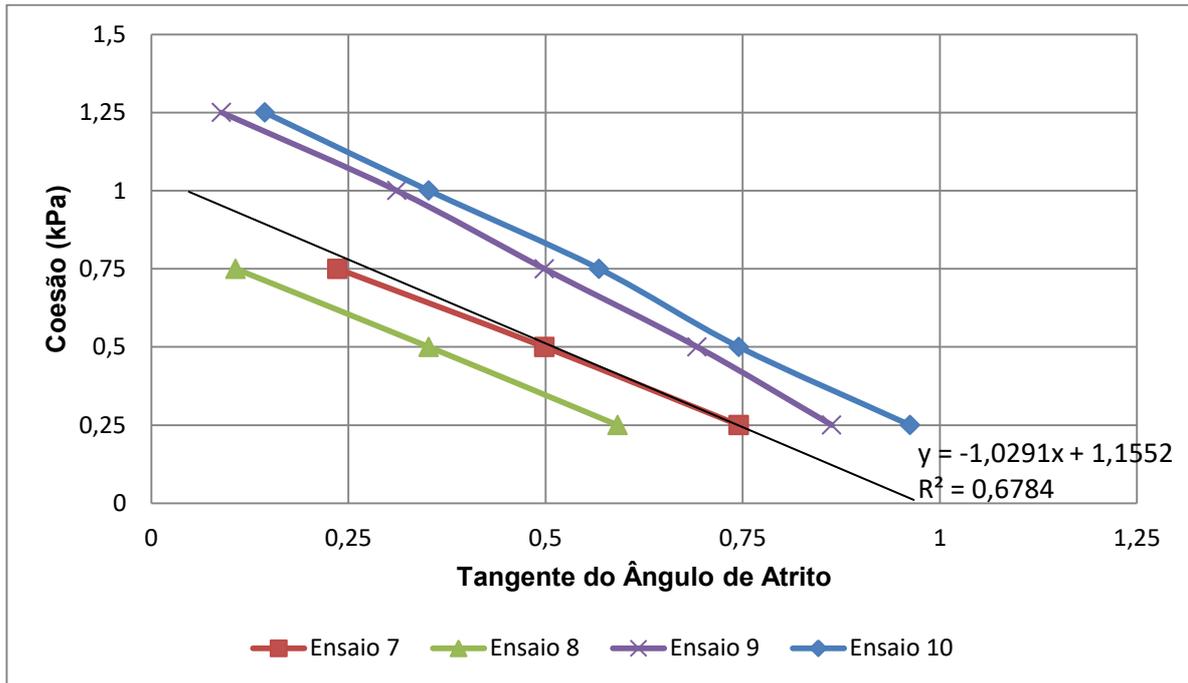
Na Tabela 17 são apresentados os valores de coesão e ângulo de atrito obtidos por retroanálises, conforme descrito no item 4.4, e na Figura 63 são apresentadas as curvas coesão *versus* tangente do ângulo de atrito e as linhas de tendência obtidas dos quatro ensaios.

Tabela 17- Parâmetros de resistência obtidos para PE6 - 6kN/m³

Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)			
	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	Ensaio 10
0,25	36,7	30,6	40,8	43,9
0,50	26,5	19,4	34,7	36,7
0,75	13,3	6,1	26,5	29,6
1,00	-	-	17,3	19,4
1,25	-	-	5,1	8,2

Fonte: Autor

Figura 62- Regressão entre Coesão e Tangente do Ângulo de Atrito (PE6 - 6kN/m³)



Fonte: Autor

Pode-se observar por meio de da Tabela 17 que apesar de nos ensaios 10 a tensão de ruptura obtida ter sido menor do que no ensaio 9, os valores de ângulo de atrito obtidos são maiores para uma mesma coesão. É possível notar também que embora as tensões de ruptura dos ensaios 7 e 8 tenham sido iguais, os valores de ângulo de atrito obtidos são diferentes, sendo maiores para o ensaio 7, para um mesmo valor de coesão. Mais uma vez, isso mostra que a geometria da superfície de ruptura interfere diretamente na obtenção dos parâmetros de resistência durante a retroanálises, além da sobrecarga.

Os ensaios 7 e 8 apresentaram ângulos de atrito menores, se comparados aos ensaios 9 e 10, o que já era esperado, já que a tensão de ruptura dessas amostras atingiu valores inferiores às amostras 9 e 10.

Para os ensaios 7 e 8 não foram encontrados parâmetros de resistência que apresentassem fator de segurança igual 1 para valores de coesão acima de 0,75 kPa, todas as combinações acima desses valores de coesão apresentavam $FS > 1$. E para os ensaios 9 e 10, não foram encontrados parâmetros de resistência que apresentassem fator de segurança igual 1 para valores de coesão acima de 1,25 kPa, todas as combinações acima desses valores de coesão apresentavam $FS > 1$.

Ao traçar a linha de tendência que passa pelos pontos de coesão e tangente do ângulo de atrito dos valores obtidos nas retroanálises dos quatro ensaios, o coeficiente de determinação alcançado é de $R^2=0,6784$, que pode ser observada na Figura 61. Nessa reta, para a coesão de 0,25 kPa o ângulo de atrito encontrado seria 41,3°, para a coesão de 0,5 kPa o ângulo de atrito seria de 32,5°, para a coesão de 0,75 kPa o ângulo de atrito seria de 21,5°, para a coesão de 1,0 kPa o ângulo de atrito seria de 8,6° e para a coesão de 1,25 kPa o ângulo de atrito seria de 5,3°.

4.2.1.4 Ensaio com peso específico igual a 7kN/m³

Na Tabela 18 pode-se observar os comprimentos L1 (horizontal) e L2 (vertical) medidos que representam os pontos por onde passa a superfície de ruptura e nas Figuras 64, 65, 66 e 67 pode-se ver os detalhes da rupturas para os ensaios denominados PE7, numerados como Ensaios 11, 12, 13 e 14 com peso específico de 7kN/m³.

Tabela 18- Comprimentos L1 e L2 medidos (PE7 - 7kN/m³)

Nomenclatura	Ensaio	L1 – horizontal (cm)	L2 – vertical (cm)
PE7	11	32,9	26,0
PE7	12	27,7	35,7
PE7	13	28,6	39,2
PE7	14	36,5	36,6

Fonte: Autor

Figura 63- Detalhe da ruptura do Ensaio 11 (PE7 - 7kN/m³)



Fonte: Autor

Figura 64- Detalhe da ruptura do Ensaio 12 (PE7 - 7kN/m³)



Fonte: Autor

Figura 65- Detalhe da ruptura do Ensaio 13 (PE7 - 7kN/m³)



Fonte: Autor

Figura 66- Detalhe da ruptura do Ensaio 14 (PE7 - 7kN/m³)

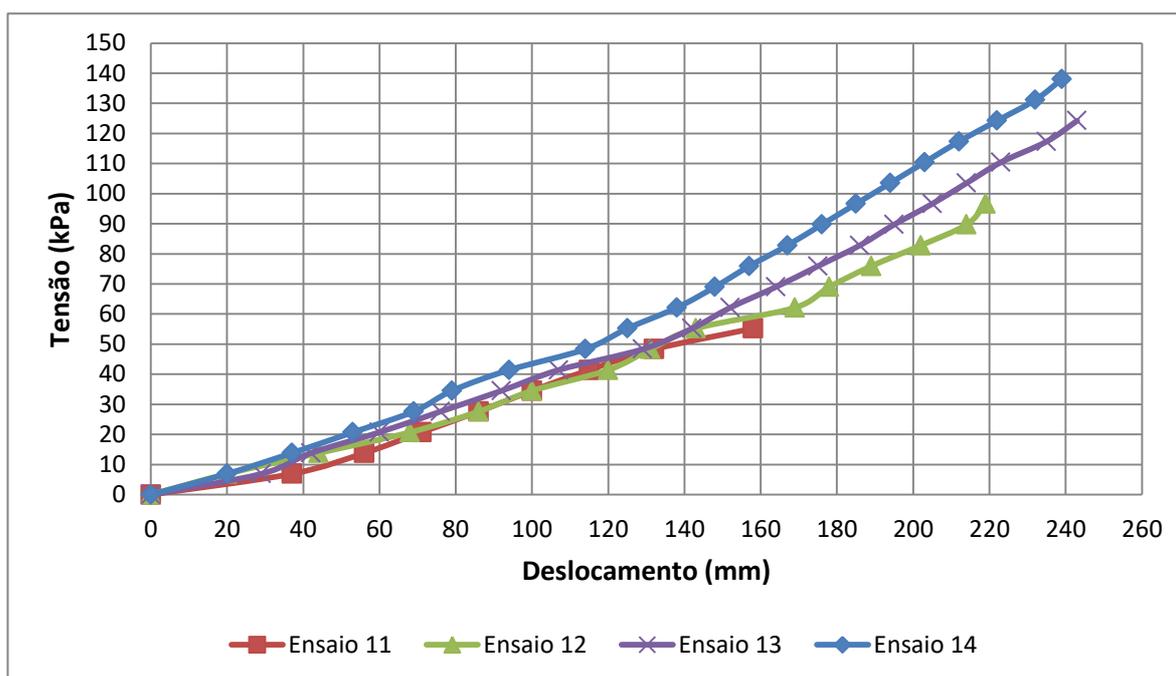


Fonte: Autor

Da mesma forma que nos ensaios 1, 2 e 3 (4 kN/m³), não é possível notar que houve uma certa relação entre o comprimento L1 e L2 nos ensaios com peso específico de 7 kN/m³, com exceção do ensaio 14, que apresentaram valores bem próximos. Também é evidente que os valores de L1 não apresentaram um padrão, variando em até 88 mm. Os valores apresentados pela distância L2 mostraram uma variação menor nos ensaios 12, 13 e 14, mas o ensaio 11 exibiu um valor bem abaixo dos encontrados nos outros ensaios. Novamente é possível observar o desprendimento do resíduo da lateral da caixa oposta ao talude nas Figuras 64, 65, 66 e 67, o que confirma a hipótese de alguns componentes contidos no lixo funcionarem como se fossem fibras.

Na Figura 68 apresenta-se as curvas tensão *versus* deslocamento vertical obtidas nos ensaios 11, 12, 13 e 14, com o peso específico de 7kN/m³.

Figura 67- Curvas tensão *versus* deslocamento (PE7 - 7kN/m³)



Fonte: Autor

Pode-se observar que as quatro amostras apresentaram tensões de ruptura e deslocamentos diferentes. A amostra do Ensaio 11 apresentou uma tensão de ruptura de 55,2 kPa e deslocamento de 158 mm. A amostra do Ensaio 12 apresentou uma tensão de ruptura de 96,6 kPa e deslocamento de 219 mm. Já a amostra do Ensaio 13 apresentou uma tensão de ruptura de 124,2 kPa e deslocamento de 243 mm. E a amostra do Ensaio 14 apresentou uma tensão de

ruptura de 138 kPa e deslocamento de 239 mm. Como as amostras apresentaram resultados diferentes, é interessante fazer uma média dos resultados. Dessa forma, a tensão de ruptura média possui o valor de 103,5 kPa, e o ensaio 11 apresenta uma tensão 53% menor do que a média, o ensaio 12 possui um valor 7% menor do que a média, o ensaio 13 tem uma tensão 20% maior que a média e o ensaio 14 exibe uma valor 33% maior do que a média.

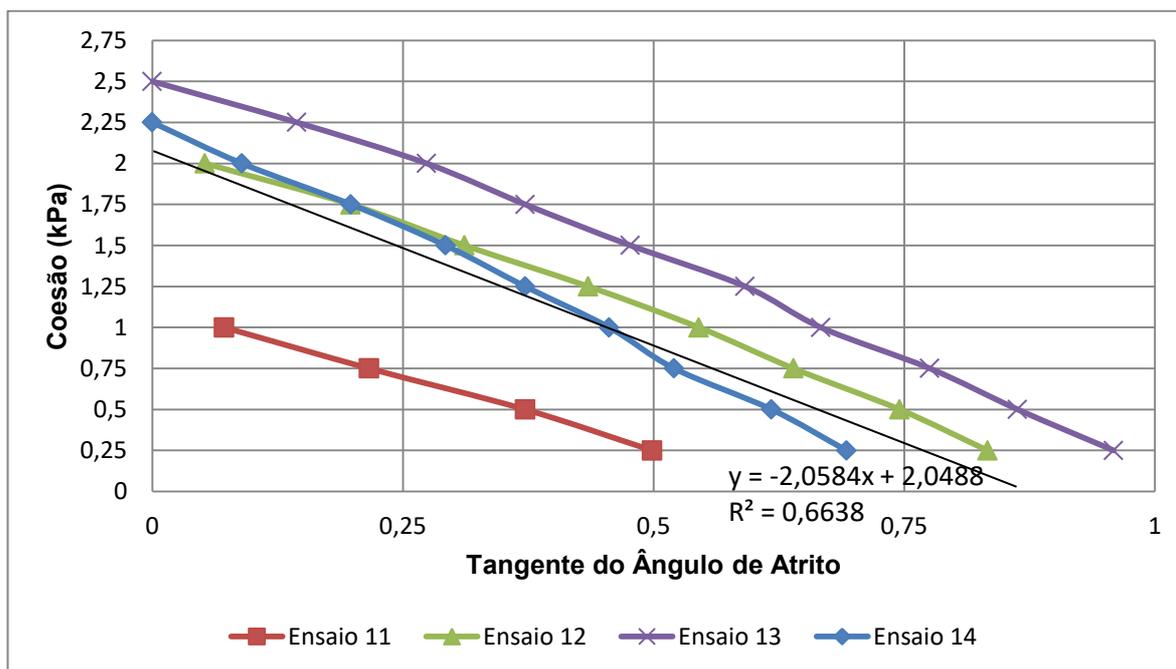
Analisando o gráfico da Figura 68, pode-se observar que o valor da ruptura obtida pela amostra 11 foi significativamente menor do que os resultados alcançados pelas outras amostras. Por isso é interessante fazer uma comparação do valor de ruptura média eliminando esse ensaio. Assim, o valor obtido da ruptura média entre os ensaios 12, 13 e 14 é 119,6 kPa e o ensaio 12 possui um valor 19% menor do que a média, o ensaio 13 tem uma tensão 4% maior que a média e o ensaio 14 exibe uma valor 15% maior do que a média.

Na Tabela 19 são apresentados os valores de coesão e ângulo de atrito obtidos por retroanálises, conforme descrito no item 4.4, e na Figura 69 são apresentadas as curvas coesão *versus* tangente do ângulo de atrito e as linhas de tendência obtidas dos quatro ensaios.

Tabela 19- Parâmetros de resistência obtidos para PE7 - 7kN/m³

Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)			
	Ensaio 11	Ensaio 12	Ensaio 13	Ensaio 14
0,25	26,5	39,8	43,8	34,7
0,50	20,4	36,7	40,8	31,7
0,75	12,2	32,6	37,8	27,5
1,00	4,1	28,6	33,7	24,5
1,25	-	23,5	30,6	20,4
1,50	-	17,3	25,5	16,3
1,75	-	11,2	20,4	11,2
2,00	-	3,0	15,3	5,1
2,25	-	-	8,2	0,0
2,5	-	-	0,0	-

Fonte: Autor

Figura 68- Regressão entre Coesão e Tangente do Ângulo de Atrito (PE7 - 7kN/m³)

Fonte: Autor

Por meio de da Tabela 19 pode-se observar que apesar de nos ensaios 12 e 13 as tensões de ruptura obtidas terem sido menores do que no ensaio 14, os valores de ângulo de atrito obtidos são maiores nesses ensaios, mostrando novamente que além da sobrecarga, a geometria da superfície de ruptura interfere diretamente na obtenção desses parâmetros durante a retroanálise. Já para o ensaio 11, no qual a amostra rompeu com uma tensão bem menor, os parâmetros de resistência encontrados são significativamente menores, se comparados aos outros ensaios e não encontrou-se resultados que apresentasse fator de segurança igual 1 para o valor de coesão igual a 1,25 kPa, todas as combinações de ângulo de atrito para esse valor de coesão apresentavam $FS > 1$.

Não foram encontrados parâmetros de resistência que apresentassem fator de segurança igual 1 para valores de coesão acima de 2 kPa, para o ensaio 12, de 2,5 kPa, para o ensaio 13, e de 2,25 kPa, para o ensaio 14. Todas as combinações acima desses valores de coesão apresentavam $FS > 1$.

Ao traçar a linha de tendência que passa pelos pontos de coesão e tangente do ângulo de atrito dos valores obtidos nas retroanálises dos quatro ensaios, o coeficiente de determinação alcançado é de $R^2 = 0,6638$, que pode ser observada na Figura 67. Nessa reta, para a coesão de

0,25 kPa o ângulo de atrito encontrado seria 41,1°, para a coesão de 0,5 kPa o ângulo de atrito seria de 36,9°, para a coesão de 0,75 kPa o ângulo de atrito seria de 32,2°, para a coesão de 1,0 kPa o ângulo de atrito seria de 27,0°, para a coesão de 1,25 kPa o ângulo de atrito seria de 21,2°, para a coesão de 1,5 kPa o ângulo de atrito seria de 14,9°, para a coesão de 1,75 kPa o ângulo de atrito seria de 8,2° e para a coesão de 2,0 kPa o ângulo de atrito seria de 1,4°.

4.2.2 Variação do teor de plásticos moles

4.2.2.1 Ensaio com 0% de plásticos moles

Na Tabela 20 pode-se observar os comprimentos L1 (horizontal) e L2 (vertical) medidos que representam os pontos por onde passa a superfície de ruptura e nas Figuras 70, 71 e 72 pode-se ver os detalhes da rupturas para os ensaios denominados PM0, numerados como Ensaio 15, 16 e 17 como teor de 0% de plásticos moles e peso específico de 7kN/m³.

Tabela 20- Comprimentos L1 e L2 medidos (PM0 - 0%)

Nomenclatura	Ensaio	L1 – horizontal (cm)	L2 – vertical (cm)
PM0	15	27,4	18,1
PM0	16	20,2	22,4
PM0	17	26,7	21,8

Fonte: Autor

Figura 69- Detalhe da ruptura do Ensaio 15 (PM0 - 0%)



Fonte: Autor

Figura 70- Detalhe da ruptura do Ensaio 16 (PM0 - 0%)



Fonte: Autor

Figura 71- Detalhe da ruptura do Ensaio 17 (PM0 - 0%)

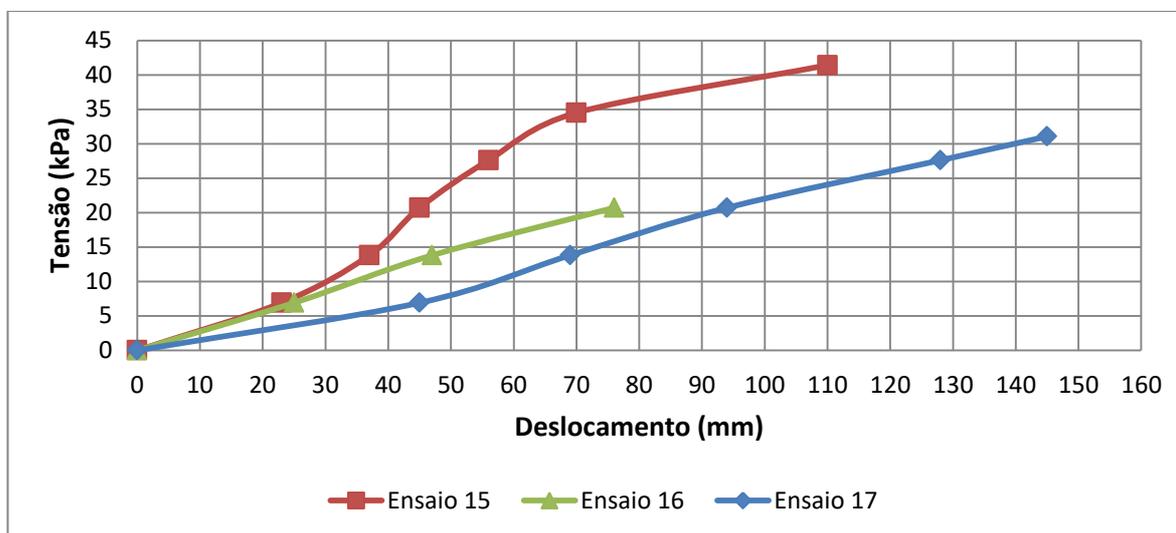


Fonte: Autor

Desta vez é possível notar que os valores apresentados pela distância L2 mostraram uma variação menor. Para a distância L1, os resultados encontrados foram bem próximos nos ensaios 15 e 17, mas o ensaio 16 apresentou um comprimento cerca de 7 cm menor. Não foi possível estabelecer uma relação entre o comprimento L1 e L2. Novamente é possível observar o desprendimento do resíduo da lateral da caixa oposta ao talude nas Figuras 70, 71 e 72, porém nota-se que a distância deslocada da lateral da caixa é bem menor se comparado aos ensaios 11, 12, 13 e 14 em que se tinha o mesmo peso específico ($PE7 - 7kN/m^3$) e a presença de plásticos moles no teor encontrado na gravimetria, em média 11,2%, o que confirma a hipótese de os plásticos moles contidos no lixo funcionarem como se fossem fibras. Ainda há esse deslocamento do resíduo devido há presença de outros materiais em sua composição que funcionam como fibras, como trapos, plásticos duros, papeis e outros.

Na Figura 73 apresenta-se as curvas tensão *versus* deslocamento vertical obtidas nos ensaios 15, 16 e 17, com o peso específico de 7kN/m^3 e teor de plásticos moles igual a 0%.

Figura 72- Curvas tensão *versus* deslocamento (PM0 - 0%)



Fonte: Autor

Pode-se observar que as três amostras apresentaram tensões de ruptura e deslocamentos diferentes. A amostra do Ensaio 15 apresentou uma tensão de ruptura de 41,4 kPa e deslocamento de 110 mm. A amostra do Ensaio 16 apresentou uma tensão de ruptura de 20,7 kPa e deslocamento de 76 mm. Já a amostra do Ensaio 17 apresentou uma tensão de ruptura de 31,1 kPa e deslocamento de 145 mm. Como as amostras apresentaram resultados diferentes, é interessante fazer uma média dos resultados. Dessa forma, a tensão de ruptura média possui o valor de 31,1 kPa, e o ensaio 15 apresenta uma tensão 33% maior do que a média, o ensaio 16 possui um valor 33% menor do que a média e o ensaio 17 exibe o mesmo valor que a média.

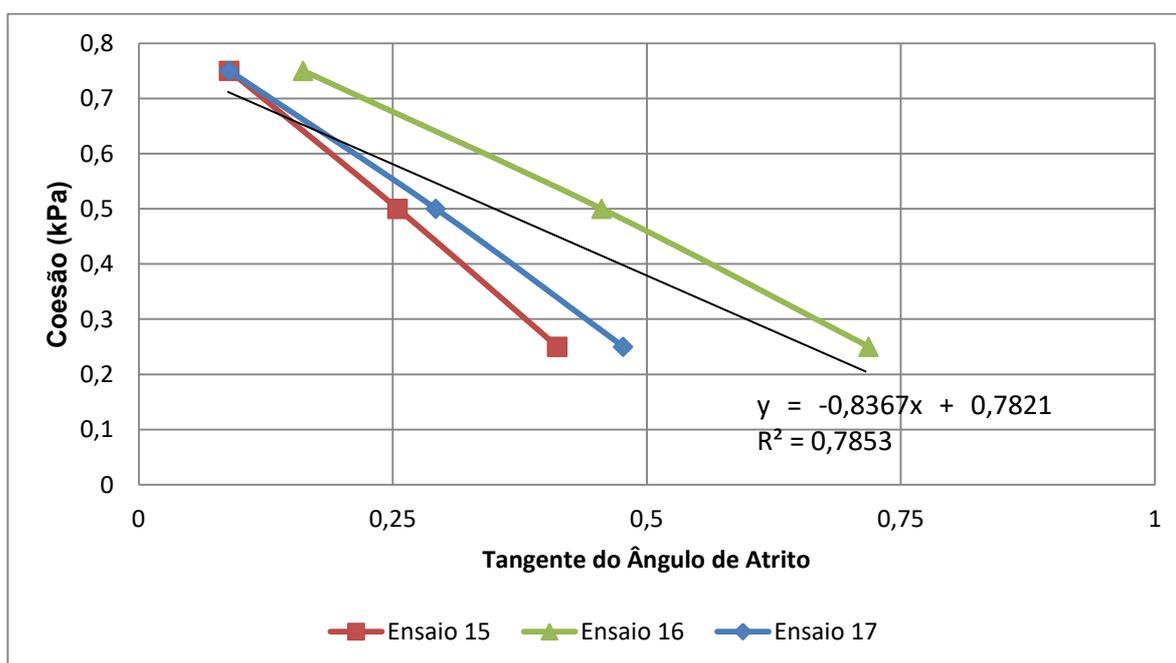
Na Tabela 21 são apresentados os valores de coesão e ângulo de atrito obtidos por retroanálises, conforme descrito no item 4.4, e na Figura 74 são apresentadas as curvas coesão *versus* tangente do ângulo de atrito e a linha de tendência obtida dos três ensaios.

Tabela 21- Parâmetros de resistência obtidos para PM0 - 0% de plástico mole

Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)		
	Ensaio 15	Ensaio 16	Ensaio 17
0,25	22,4	35,7	25,5
0,5	14,3	24,5	16,3
0,75	5,1	9,2	5,1

Fonte: Autor

Figura 73- Regressão entre Coesão e Tangente do Ângulo de Atrito (PM0 - 0%)



Fonte: Autor

Pode-se observar na Tabela 21 que apesar de no ensaio 16 a tensão de ruptura obtida ter sido menor do que nos ensaios 15 e 17, os valores de ângulo de atrito obtidos são maiores para esse ensaio, evidenciando novamente que além da sobrecarga, a geometria da superfície de ruptura interfere diretamente na obtenção desses parâmetros durante a retroanálise. Embora as amostras dos ensaios 15 e 17 também tenham rompido com tensões diferentes, os valores de ângulos de atrito encontrados nas retroanálises são relativamente próximos, chegando a ser iguais para o valor de coesão igual a 0,75 kPa.

Não foram encontrados parâmetros de resistência que apresentassem fator de segurança igual 1 para valores de coesão acima de 0,75 kPa, todas as combinações acima desses valores de coesão apresentavam $FS > 1$.

Ao traçar a linha de tendência que passa pelos pontos de coesão e tangente do ângulo de atrito dos valores obtidos nas retroanálises dos três ensaios, o coeficiente de determinação alcançado é de $R^2=0,7853$, que pode ser observada na Figura 74. Nessa reta, para a coesão de 0,25 kPa o ângulo de atrito encontrado seria $32,5^\circ$, para a coesão de 0,5 kPa o ângulo de atrito seria de $18,6^\circ$ e para a coesão de 0,75 kPa o ângulo de atrito seria de $2,2^\circ$.

4.2.2.2 Ensaio com 3% de plásticos moles

Na Tabela 22 pode-se observar os comprimentos L1 (horizontal) e L2 (vertical) medidos que representam os pontos por onde passa a superfície de ruptura e nas Figuras 75, 76 e 77 pode-se ver os detalhes da rupturas para os ensaios denominados PM3, numerados como Ensaio 18, 19 e 20 como teor de 3% de plásticos moles e peso específico de 7kN/m^3 .

Tabela 22- Comprimentos L1 e L2 medidos (PM3 - 3%)

Nomenclatura	Ensaio	L1 – horizontal (cm)	L2 – vertical (cm)
PM3	18	19,9	20,4
PM3	19	36,6	37,5
PM3	20	28,0	27,5

Fonte: Autor

Figura 74- Detalhe da ruptura do Ensaio 18 (PM3 - 3%)



Fonte: Autor

Figura 75- Detalhe da ruptura do Ensaio 19 (PM3 - 3%)



Fonte: Autor

Figura 76- Detalhe da ruptura do Ensaio 20 (PM3 - 3%)



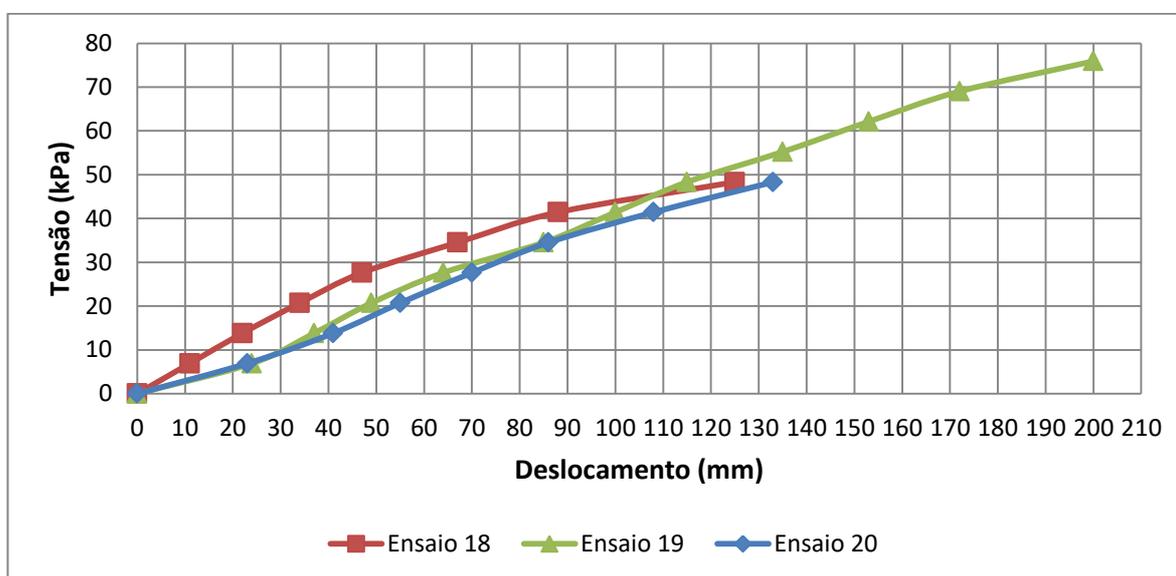
Fonte: Autor

Ao comparar os valores das distâncias $L1$ com as $L2$, é possível notar que os valores apresentados mostram uma certa relação, na qual as distâncias medidas apresentam valores muito próximos. Porém, não é possível fazer uma relação entre os números encontrados para os pares de comprimentos $L1$ e $L2$ quando comparamos os ensaios 18, 19 e 20 entre si. Novamente é possível observar o desprendimento do resíduo da lateral da caixa oposta ao talude nas Figuras 75, 76 e 77, nota-se que a distância deslocada da lateral da caixa é maior se comparada aos ensaios 15, 16 e 17, que possui 0% de plásticos moles e peso específico de 7kN/m^3 , e bem menor se comparado aos ensaios 11, 12, 13 e 14, em que se tinha o mesmo peso específico (PE7 - 7kN/m^3) e a presença de plásticos moles no teor encontrado na

gravimetria (em média 11,2%), o que confirma a hipótese de os plásticos moles contidos no lixo funcionarem como se fossem fibras.

O ensaio 19 apresentou um maior desprendimento do resíduo da lateral da caixa oposta ao talude e também as distâncias L1 e L2 medidas foram maiores, se comparados aos ensaios 18 e 20. Isso aconteceu, muito provavelmente, pelo fato de a tensão de ruptura da amostra do ensaio 19 ter sido significativamente maior do que a dos outros ensaios, como pode ser observado na Figura 78.

Figura 77- Curvas tensão versus deslocamento (PM3 - 3%)



Fonte: Autor

Analisando o gráfico da Figura 78 pode-se observar que as amostras dos ensaios 18 e 20 romperam com o mesmo nível de tensão, 48,3 kPa. A amostra do ensaio 18 teve um deslocamento de 125 mm e a do ensaio 20 um deslocamento de 133 mm. Nota-se que o ensaio 19 atingiu tensões bem maiores do que os ensaios 18 e 20, chegando a 75,9 kPa, com um deslocamento de 200 mm. No momento em que se estava desmontando a amostra do ensaio 19, encontrou-se um amontoado de trapos na região de formação da superfície de ruptura. Como esse tipo de material também funciona como um tipo de fibra no resíduo, relaciona-se a tensão de ruptura elevada à presença desse material.

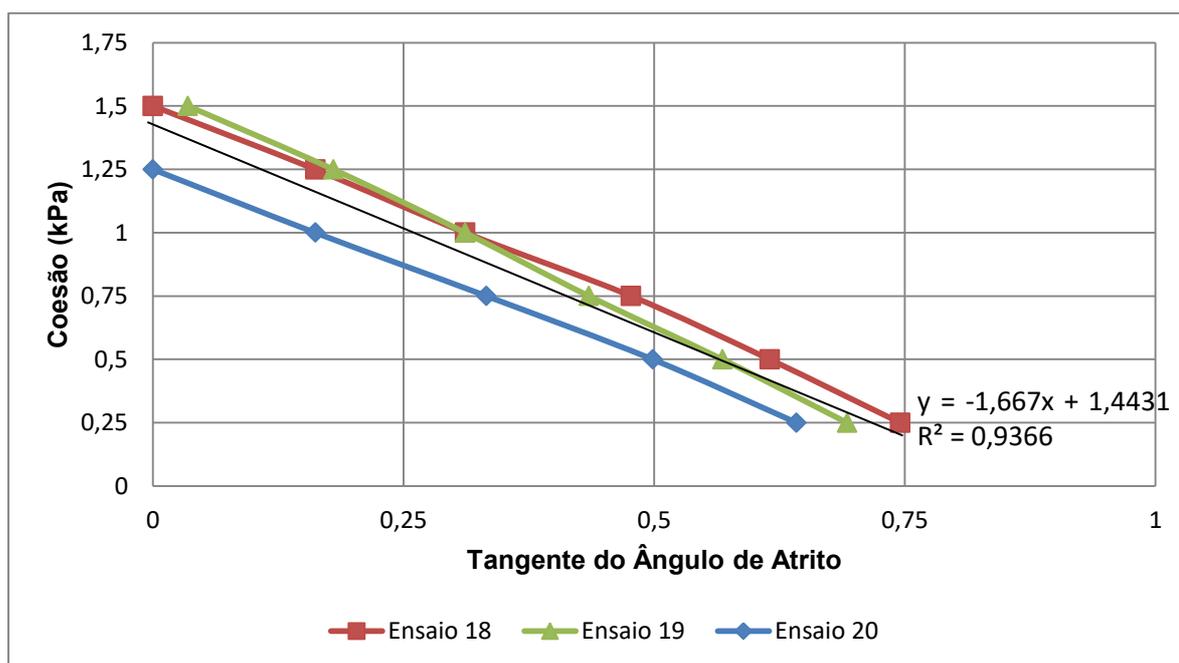
Na Tabela 23 são apresentados os valores de coesão e ângulo de atrito obtidos por retroanálises, conforme descrito no item 4.4, e na Figura 79 são apresentadas as curvas coesão *versus* tangente do ângulo de atrito e a linha de tendência obtida dos três ensaios.

Tabela 23- Parâmetros de resistência obtidos para PM3 - 3% de plástico mole

Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)		
	Ensaio 18	Ensaio 19	Ensaio 20
0,25	36,7	34,7	32,7
0,50	31,6	29,6	26,5
0,75	25,5	23,5	18,4
1,00	17,3	17,3	9,2
1,25	9,2	10,2	0,0
1,50	0,0	2,0	-

Fonte: Autor

Figura 78- Regressão entre Coesão e Tangente do Ângulo de Atrito (PM3 - 3%)



Fonte: Autor

É possível observar na Tabela 23 que apesar de no ensaio 19 a tensão de ruptura obtida ter sido bem maior do que nos ensaios 18 e 20, os valores de ângulo de atrito obtidos são bem próximos dos encontrados para o ensaio 18, chegando até mesmo a ser menores para as coesões de 0,25, 0,50 e 0,75 kPa. Também é possível notar que embora os ensaios 18 e 20 tenham alcançado tensões de ruptura iguais, os valores de ângulo de atrito encontrados nas retroanálises do ensaio 20 são inferiores aos encontrados para o ensaio 18. Isso mostra mais

uma vez que além da sobrecarga, a geometria da superfície de ruptura interfere diretamente na obtenção desses parâmetros durante a retroanálise.

Para o ensaio 20, não foram encontrados parâmetros de resistência que apresentassem fator de segurança igual 1 para valores de coesão acima de 1,25 kPa, todas as combinações acima desses valores de coesão apresentavam $FS > 1$.

Para os ensaios 18 e 19, não foram encontrados parâmetros de resistência que apresentassem fator de segurança igual 1 para valores de coesão acima de 1,50 kPa, todas as combinações acima desses valores de coesão apresentavam $FS > 1$.

Ao traçar a linha de tendência que passa pelos pontos de coesão e tangente do ângulo de atrito dos valores obtidos nas retroanálises dos três ensaios, o coeficiente de determinação alcançado é de $R^2=0,9366$, que pode ser observada na Figura 79. Nessa reta, para a coesão de 0,25 kPa o ângulo de atrito encontrado seria 35,6°, para a coesão de 0,5 kPa o ângulo de atrito seria de 29,5° e para a coesão de 0,75 kPa o ângulo de atrito seria de 22,6°, para a coesão de 1,0 kPa o ângulo de atrito encontrado seria 14,9° e para a coesão de 1,25 kPa o ângulo de atrito seria de 6,6°.

4.2.2.3 Ensaio com 6% de plásticos moles

Na Tabela 24 pode-se observar os comprimentos L1 (horizontal) e L2 (vertical) medidos que representam os pontos por onde passa a superfície de ruptura e nas Figuras 80, 81 e 82 pode-se ver os detalhes da rupturas para os ensaios denominados PM6, numerados como Ensaios 21, 22 e 23 como teor de 6% de plásticos moles e peso específico de 7kN/m³.

Tabela 24- Comprimentos L1 e L2 medidos (PM6 - 6%)

Nomenclatura	Ensaio	L1 – horizontal (cm)	L2 – vertical (cm)
PM6	21	33,6	37,5
PM6	22	35,7	34,9
PM6	23	25,8	22,8

Fonte: Autor

Figura 79- Detalhe da ruptura do Ensaio 21 (PM6 - 6%)



Fonte: Autor

Figura 80- Detalhe da ruptura do Ensaio 22 (PM6 - 6%)



Fonte: Autor

Figura 81- Detalhe da ruptura do Ensaio 23 (PM6 - 6%)



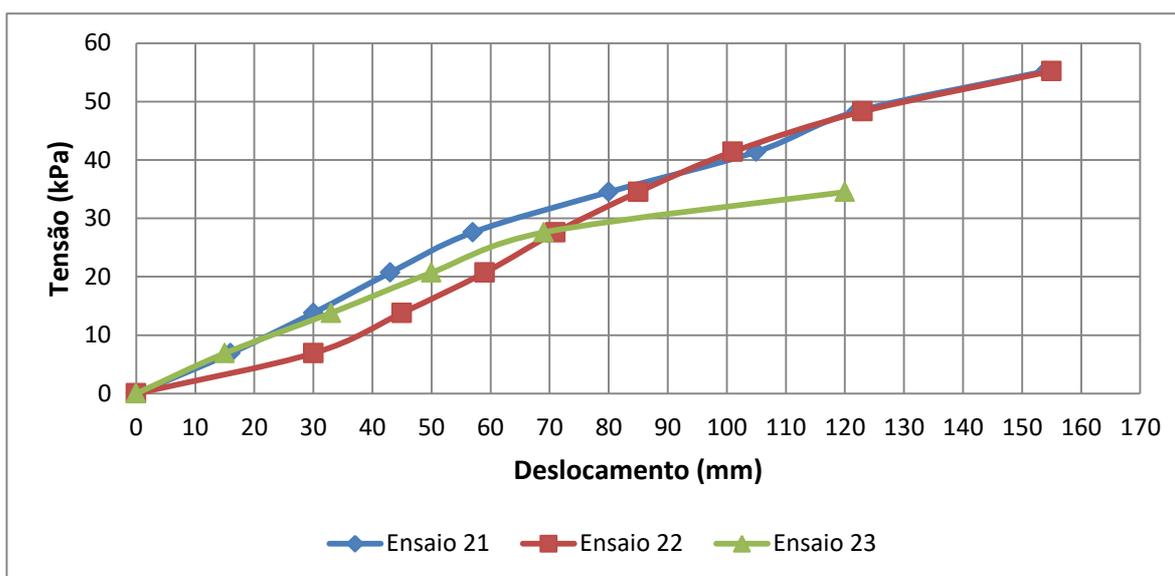
Fonte: Autor

Ao comparar os valores das distâncias $L1$ com as $L2$, é possível notar que os valores apresentados mostram uma certa relação, as distâncias medidas apresentam valores muito

próximos para o ensaio 22 e para os ensaios 21 e 23 a variação é um pouco maior. As medidas de comprimento encontradas para os ensaios 21 e 22 apresentaram valores relativamente próximos, porém no ensaio 23 os valores encontrados foram menores. Novamente é possível observar o desprendimento do resíduo da lateral da caixa oposta ao talude nas Figuras 80, 81 e 82, nota-se que a distância deslocada da lateral da caixa é maior se comparada aos ensaio que possuía teor de 0% e 3% de plásticos moles, e menor se comparado aos ensaios 11, 12, 13 e 14, em que se tinha o mesmo peso específico ($PE7 - 7\text{kN/m}^3$) e a presença de plásticos moles no teor encontrado na gravimetria (em média 11,2%), o que confirma a hipótese de os plásticos moles contidos no lixo funcionarem como se fossem fibras.

Na Figura 83 apresentasse as curvas tensão *versus* deslocamento vertical obtidas nos ensaios 21, 22 e 23, com o peso específico de 7kN/m^3 e teor de plásticos moles igual a 6%.

Figura 82- Curvas tensão *versus* deslocamento (PM6 - 6%)



Fonte: Autor

Analisando o gráfico da Figura 83 pode-se observar que as amostras dos ensaios 21 e 22 romperam com o mesmo nível de tensão, 55,2 kPa. A amostra do ensaio 21 teve um deslocamento de 154 mm e a do ensaio 22 um deslocamento de 155 mm. Nota-se que o ensaio 23 atingiu tensões menores do que os ensaios 21 e 22 chegando a 34,5 kPa, com um deslocamento de 120 mm. Como as amostras apresentaram resultados diferentes, é interessante fazer uma média dos resultados. Dessa forma, a tensão de ruptura média possui o

valor de 48,3 kPa, e os ensaios 21 e 22 apresentam uma tensão 14% maior do que a média e o ensaio 23 apresenta o valor 29% menor que a média.

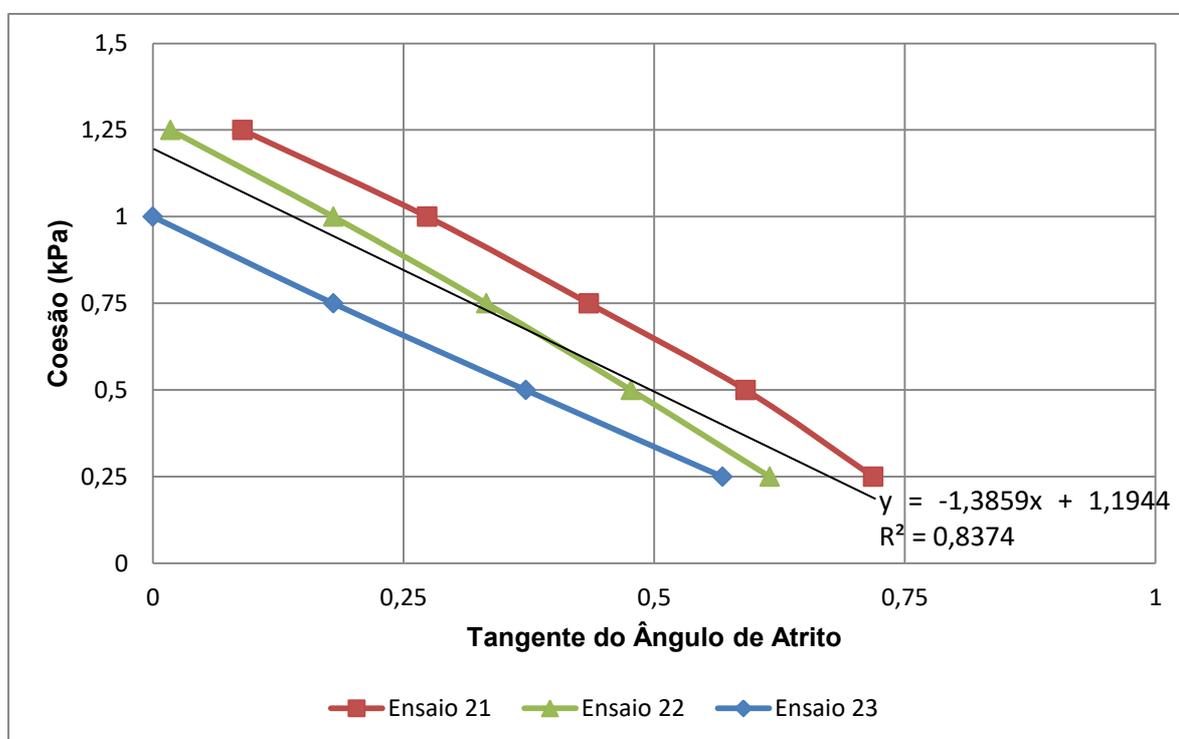
Na Tabela 25 são apresentados os valores de coesão e ângulo de atrito obtidos por retroanálises, conforme descrito no item 4.4, e na Figura 84 são apresentadas as curvas coesão *versus* tangente do ângulo de atrito e a linha de tendência obtida dos três ensaios.

Tabela 25- Parâmetros de resistência obtidos para PM6 - 6% de plástico mole

Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)		
	Ensaio 21	Ensaio 22	Ensaio 23
0,25	35,7	31,6	29,6
0,50	30,6	25,5	20,4
0,75	23,5	18,4	10,2
1,00	15,3	10,2	0,0
1,25	5,1	1,0	-

Fonte: Autor

Figura 83- Regressão entre Coesão e Tangente do Ângulo de Atrito (PM6 - 6%)



Fonte: Autor

Pode-se observar por meio de da Tabela 25 que apesar de nos ensaios 21 e 22 a tensão de ruptura obtida ter sido a mesma, os valores de ângulo de atrito obtidos são diferentes para uma mesma coesão, sendo maiores para o ensaio 21 na ordem de 5°, mostrando mais uma vez que a geometria da superfície de ruptura interfere diretamente na obtenção desses parâmetros durante a retroanálises, além da sobrecarga.

Para o ensaio 23 os ângulos de atrito encontrados nas retroanálises foram menores, se comparados aos ensaios 21 e 22, o que já era esperado, já que a tensão de ruptura dessa amostra atingiu valores inferiores às amostras 21 e 22. Não foram encontrados parâmetros de resistência que apresentassem fator de segurança igual 1 para valores de coesão acima de 1,0 kPa, todas as combinações acima desses valores de coesão apresentavam $FS > 1$.

Para os ensaios 21 e 22, não foram encontrados parâmetros de resistência que apresentassem fator de segurança igual 1 para valores de coesão acima de 1,25 kPa, todas as combinações acima desses valores de coesão apresentavam $FS > 1$.

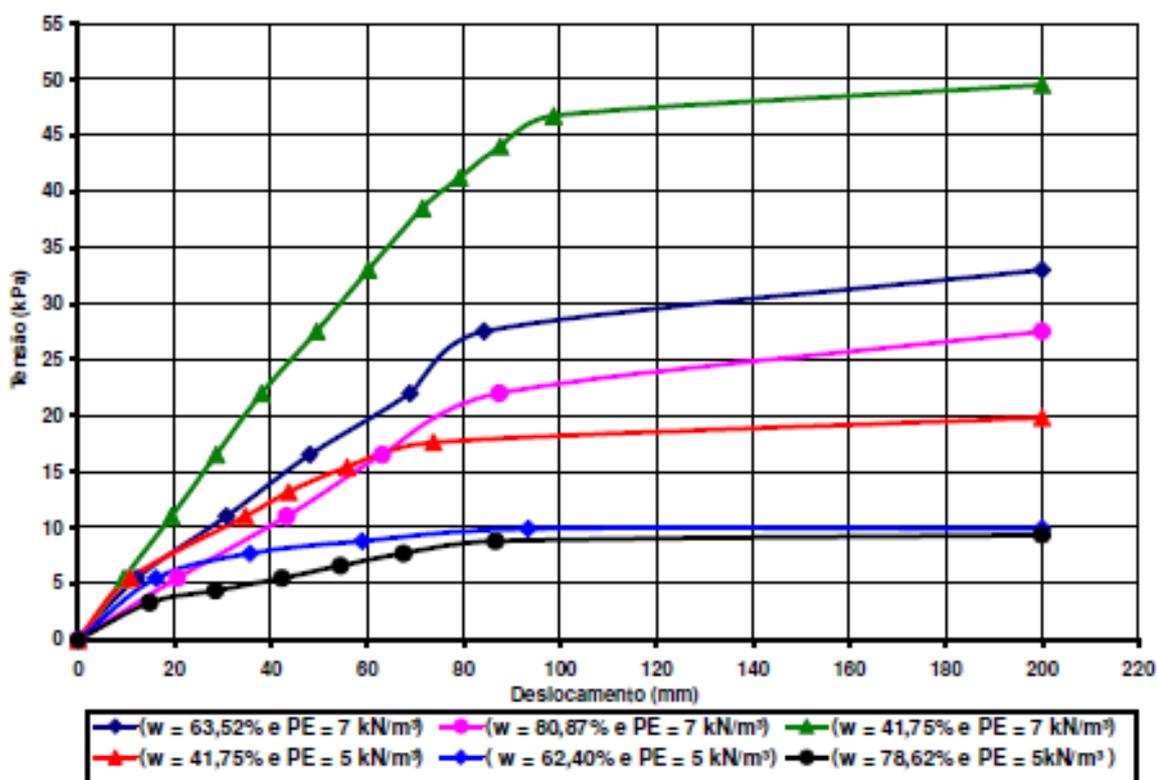
Ao traçar a linha de tendência que passa pelos pontos de coesão e tangente do ângulo de atrito dos valores obtidos nas retroanálises dos três ensaios, o coeficiente de determinação alcançado é de $R^2=0,8374$, que pode ser observada na Figura 84. Nessa reta, para a coesão de 0,25 kPa o ângulo de atrito encontrado seria 34,3°, para a coesão de 0,5 kPa o ângulo de atrito seria de 26,6° e para a coesão de 0,75 kPa o ângulo de atrito seria de 17,8° e para a coesão de 1,0 kPa o ângulo de atrito encontrado seria 8,0°.

4.2.3 Ensaio usando compressor de ar

Uma das adaptações realizadas no equipamento utilizado nesse trabalho em relação ao equipamento desenvolvido por Ribeiro (2007) foi a utilização de um macaco hidráulico como sistema de aplicação de carga ao invés de um compressor de ar. Essa adaptação foi realizada pois o pistão escolhido para ser utilizado nesse trabalho apresenta um curso maior, com 27 cm, e seu sistema de carga é hidráulico e acreditava-se que o sistema de pistão a ar e compressor de ar disponíveis não atenderiam os deslocamentos e as cargas alcançadas no presente trabalho.

A princípio essa adaptação não traria nenhuma alteração nos resultados. Porém, ao comparar as curvas tensão *versus* deslocamento obtidas nesse trabalho e as apresentadas por Ribeiro (2007), observou-se que os gráficos obtidos no presente trabalho não atingiam um patamar final, no qual o deslocamento obtido seria significativamente maior do que os outros, com um incremento de carga pequeno, conforme pode ser observado na Figura 85.

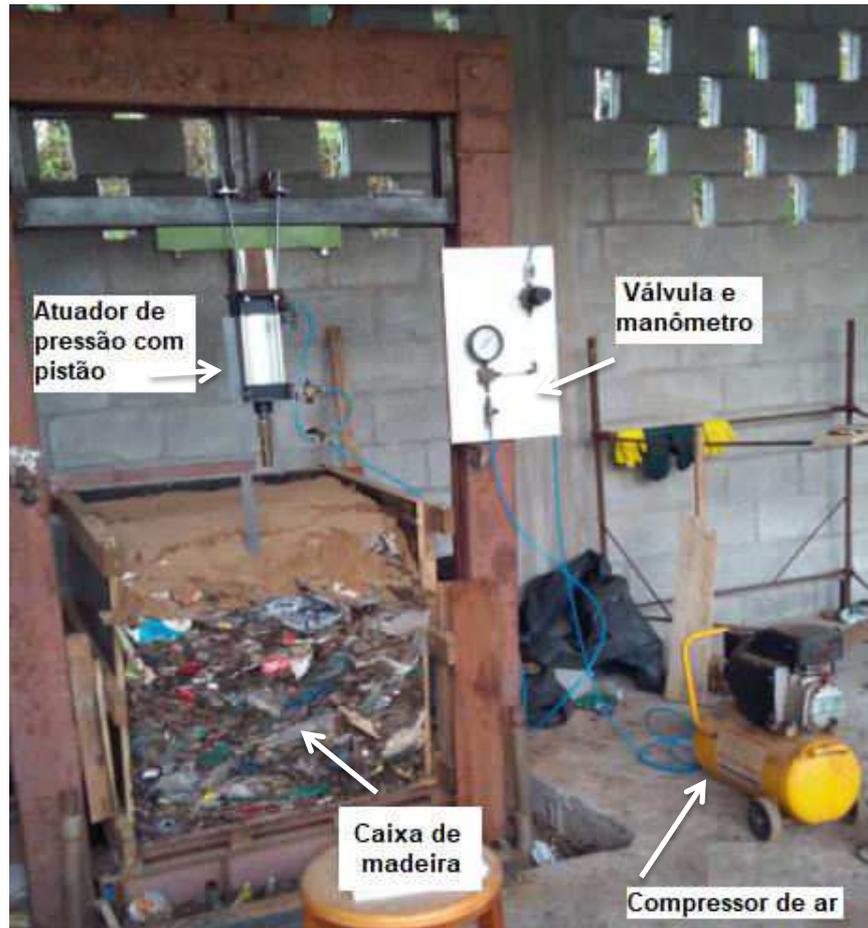
Figura 84- Comparação entre as curvas tensão *versus* deslocamento obtidas por Ribeiro (2007)



Fonte: Ribeiro (2007)

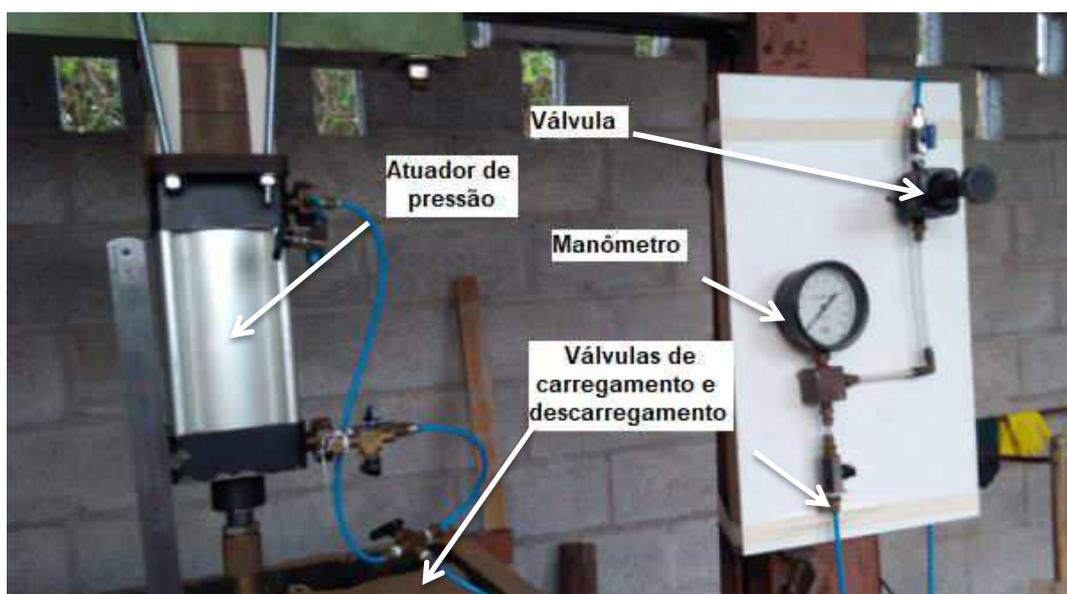
Desta forma, decidiu-se fazer um teste usando o sistema com o compressor de ar para tentar atingir esse patamar de deformação. Escolheu-se o peso específico de 4 kN/m^3 e o teor de plásticos natural da amostra, ou seja, 11,2%, já que as tensões de rupturas e as deformações não foram altas nos outros ensaios equivalentes a esses. O novo sistema pode ser observado na Figura 86 e um detalhe do sistema de aplicação de carga pode ser visto na Figura 87.

Figura 85- Vista geral do equipamento com compressor de ar



Fonte: Autor

Figura 86- Sistema de aplicação de carga



Fonte: Autor

Na Tabela 26 pode-se observar os comprimentos L1 (horizontal) e L2 (vertical) medidos que representam os pontos por onde passa a superfície de ruptura e na Figura 88 pode-se ver os detalhes da ruptura do Ensaio 24 com peso específico de 4kN/m^3 usando o compressor de ar.

Tabela 26- Comprimentos L1 e L2 medidos - compressor de ar (PE4 - 4kN/m^3)

Ensaio	L1 – horizontal (cm)	L2 – vertical (cm)
24	19,0	23,4

Fonte: Autor

Figura 87- Detalhe da ruptura do Ensaio 24 - teste compressor de ar (PE4 - 4kN/m^3)

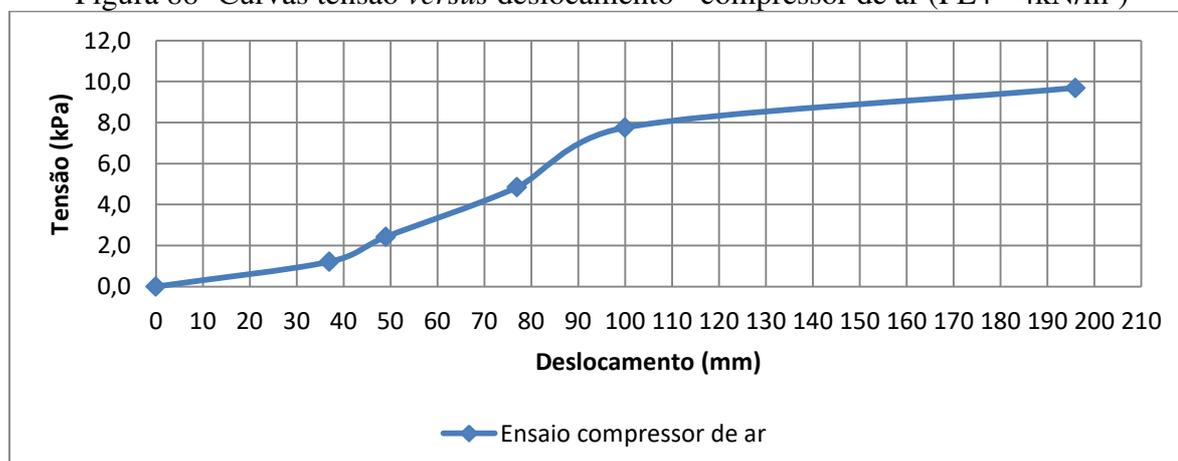


Fonte: Autor

Como pode-se observar na tabela 26, não há uma relação nos comprimentos L1 e L2 encontrados para o teste usando o compressor de ar, porém ele apresentou um resultado próximo do encontrado no ensaio 1 (L1=20,0 cm e L2=24,2 cm).

Na Figura 89, apresentasse a curva tensão *versus* deslocamento vertical obtida no teste usando o compressor de ar.

Figura 88- Curvas tensão *versus* deslocamento - compressor de ar (PE4 - 4kN/m^3)



Fonte: Autor

Analisando o gráfico da Figura 89, pode-se perceber que usando o compressor de ar o patamar final de deslocamento foi atingido. A amostra desse ensaio apresentou uma tensão de ruptura de 9,7 kPa e um deslocamento de 196 mm, sendo coerente com os resultados encontrados nos ensaios 1, 2 e 3.

Na Tabela 27 são apresentados os valores de coesão e ângulo de atrito obtidos por retroanálises, conforme descrito no item 4.4.

Tabela 27- Parâmetros de resistência obtidos para 4kN/m³ com compressor de ar

Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
	Ensaio 24
0,25	27,5

Fonte: Autor

Pode-se observar que os resultados obtidos nas retroanálises para o ensaio usando o compressor de ar foram bem parecidos dos encontrados nos ensaios 1, 2 e 3, já que o ângulo de atrito variou de 24,5° a 32,6° nesses ensaios, para uma coesão de 0,25 kPa.

Para o ensaio com compressor de ar não se encontraram resultados que apresentasse fator de segurança igual 1 para o valor de coesão igual a 0,5 kPa, todas as combinações de ângulo de atrito para esse valor de coesão apresentavam FS > 1.

A diferença na representação dos gráficos se explica pela forma de aplicação de carga que os dois mecanismos utilizam. O macaco hidráulico aplica a carga por meio de do pistão e quando a ruptura ocorre há um alívio na carga aplicada, havendo uma diminuição brusca da pressão registrada no relógio do anel dinamométrico, mostrando que o material não suportava mais aqueles níveis de tensão. Como a carga aplicada diminuía bruscamente, a deformação vertical medida estagnava ou, em alguns casos, havia uma expansão da amostra. Já o compressor de ar aplica uma carga constante. Isso significa que, mesmo após a ruptura da amostra, a carga continua sendo aplicada. Desta forma, a amostra que já rompeu não é capaz de suportar as cargas aplicadas e continuam deformando até que se atinja o limite do pistão ou que a sapata escorregue completamente, gerando deslocamentos maiores. Assim, quando o gráfico é traçado, os ensaios que utilizam o compressor de ar geram um patamar final de deslocamento,

enquanto nos gráficos dos ensaios que utilizam o macaco hidráulico esse patamar não é atingido.

4.3 Comparação dos resultados

Nas Tabelas 28 pode-se observar todos os resultados obtidos nos 23 ensaios e nas retroanálises realizadas, incluindo as distâncias L1 e L2 que definem a superfície de ruptura, a tensão de ruptura, deslocamento final alcançado e os parâmetros de resistência encontrados. E na Tabela 29 são apresentados os parâmetros de resistência obtidos por meio de da linha de tendência traçada entre os pontos das curvas dos gráficos coesão *versus* tangente do ângulo de atrito e as tensões de ruptura média obtidas nos ensaios.

Fonte: Autor

Tabela 29- Comparação dos resultados obtidos

Nomenclatura	PE4	PE5	PE6	PE7	PM0	PM3	PM6
Ensaios	1, 2 e 3	4, 5 e 6	7, 8, 9 e 10	11, 12, 13 e 14	15, 16 e 17	18, 19 e 20	21, 22 e 23
Peso Específico (kN/m ³)	4	5	6	7	7	7	7
Teor de plástico (%)	11,2	11,2	11,2	11,2	0	3	6
Tensão de Ruptura Média (kPa)	8,0	46,0	36,1	103,5	31,1	57,5	48,3
Coefficiente de Determinação	0,9351	0,9582	0,6784	0,6638	0,7853	0,9366	0,8374
Parâmetros de Resistência							
Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)						
0,25	28,2	32,5	41,3	41,1	32,5	35,6	34,3
0,50	0,3	23,5	32,5	36,9	18,6	29,5	26,6
0,75	-	13,0	21,5	32,2	2,2	22,6	17,8
1,00	-	1,6	8,6	27,0	-	14,9	8,0
1,25	-	-	5,3	21,2	-	6,6	-
1,50	-	-	-	14,9	-	-	-
1,75	-	-	-	8,2	-	-	-
2,00	-	-	-	1,4	-	-	-

Fonte: Autor

Por meio de da Tabela 28 pode-se notar que as distâncias L1 e L2 que definem a superfície de ruptura do talude apresentam uma grande variação de valores. Para o comprimento L1 o menor valor encontrado foi de 18,0 cm no ensaio 10 e o maior valor foi de 39,9 cm para o ensaio 4, exibindo uma variação de 21,9 cm. Para a distância L2 o menor valor encontrado foi de 18,1 no ensaio 15 e o maior valor foi 39,9 no ensaio 4, apresentando uma variação de 21,8 cm.

Em alguns ensaios ao comparar os valores de L1 e L2 encontrados, alguns valores medidos se mostraram relativamente próximos. Isso pôde ser notado nos ensaios 3, 4, 5, 8, 14, 16, 18, 19, 20, 22 e 23, ou seja, em 11 dos 23 ensaios realizados, o que representa 48% do total.

A menor tensão de ruptura encontrada foi de 6,9 kN/m³ para o resíduo com peso específico de 4kN/m³ e a maior tensão de ruptura alcançada foi de 138 kPa para uma compactação com peso específico de 7 kN/m³, o que representa um ganho de 1900%.

O menor deslocamento vertical foi de 76 mm e esse valor foi encontrado para o ensaio 16, no qual o teor de plástico na amostra era 0%. O maior deslocamento atingido foi 245 mm no ensaio 5, no qual o teor de plástico era de 11,2% e peso específico de 5kN/m³. De modo geral, pode-se perceber pela Tabela 26 que os menores deslocamentos aconteceram nas amostras que tinham um percentual nulo ou baixo de plásticos moles, o que mostra que a presença desse material atua como uma fibra que faz com que o resíduo ganhe uma capacidade de se deformar sem atingir a ruptura rapidamente. Nota-se também que as maiores deformações foram alcançadas pelas amostras que atingiram tensões de ruptura maiores.

Nas retroanálises realizadas para a obtenção dos parâmetros de segurança pode-se observar que houve uma variação muito grande nos valores dos ângulos de atrito obtidos para uma mesma coesão, em ensaios com amostras com as mesmas características.

Nos ensaios PE4 a coesão variou de 0,25 kPa a 0,5 kPa e o ângulo de atrito apresentou uma variação bem grande entre 1° até 32,6°. Nos ensaios PE5 a coesão foi de 0,25 kPa até 1,0 kPa e os ângulos de atrito calculados variaram entre 1° e 34,7°. Para os ensaios PE6 a coesão variou entre 0,25 e 1,25 kPa e os ângulos de atrito encontrados ficaram entre 5,1° e 43,9°. Nos ensaios PE7 a coesão variou de 0,25 kPa a 2,5 kPa e os ângulos de atrito calculados variaram entre 0° e 43,8°.

Os ensaios PM0 apresentaram uma variação da coesão de 0,25 kPa até 0,75 kPa os ângulos de atrito encontrados ficaram entre 5,1° e 35,7°. Nos ensaios PM3 a variação na coesão foi de 0,25 a 1,50 kPa e no ângulo de atrito o intervalo foi de 0° e 36,7°. Para os ensaios PM6, a coesão foi de 0,25 a 1,25 kPa e os ângulos de atrito calculados ficaram entre 1,0° e 35,7°.

Os valores dos parâmetros de resistência dos resíduos encontrados variam significativamente, indo de 0,25 a 2,5 kPa para a coesão e de 0° a 43,9° para o ângulo de atrito.

Daciolo et al. (2018), realizaram uma síntese de 12 trabalhos disponibilizados na literatura, avaliando estatisticamente dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento e peso específico dos RSU, totalizando 171 pares de coesão e ângulo de atrito. Nos trabalhos avaliados o ângulo de atrito variou 2,7° a 55° e a coesão variou de 0,93 a 80 kPa.

Boscov (2008) apresenta uma tabela com os valores de parâmetros de resistência encontrados por diversos autores (Tabela 7). Dentro dos valores apresentados, a coesão varia de 0 a 60 kPa e o ângulo de atrito varia de 20,5° a 49°.

Alguns autores procuraram sistematizar as variações encontradas nos parâmetros de resistência de RSU, definindo faixas de valores para serem adotadas em projetos. Bouazza e Wojnarowicz, (1999, apud BOSCOV, 2008) recomendam valores entre 25° e 35° para o ângulo de atrito considerando a coesão nula. Já Sanchez-Alciturri et al. (1993, apud BOSCOV, 2008) sugerem valores de ângulo de atrito 22,5° e 27° para uma coesão igual a 0 kPa.

Ribeiro (2007) realizou ensaios de prova de carga confinado em laboratório com o uso de uma sapata apoiada em RSU dispostos em manilhas de concreto e ensaios de prova de carga em taludes, e ao final de seu trabalho sugere a adoção de 12 kPa para a coesão e 30° para o ângulo de atrito.

Considerando condições de poropressão crítica, Benvenuto e Cunha (1991) obtiveram como ângulo de atrito e coesão os valores de 22° e 13,5 kPa, respectivamente. Já Azevedo (2005 apud RIBEIRO, 2007) recomenda os valores de ângulo de atrito igual a 28° e coesão igual 10 kPa para projetos de aterros sanitários.

A partir das curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, obtidas por ensaio de cisalhamento direto em amostras, Martins (2006) obteve as envoltórias de ruptura de resíduos, em função dos diferentes níveis de deslocamento horizontal. Por meio das retas obtidas, os resultados obtidos para um deslocamento de 20% os parâmetros de resistência são $15,7^\circ$ para o ângulo de atrito e 35,6 kPa para a coesão, para resíduos com fibras, e $6,9^\circ$ para o ângulo de atrito e 7,8 kPa para a coesão, para resíduos sem fibras.

Ao realizar ensaio de cisalhamento direto em resíduos de diferentes idades sobre condições drenadas, Abreu (2015) observou que se considerando envoltórias com deslocamento de 20% os parâmetros de resistência para o resíduo com 2 anos de idade foram de 13,7 kPa para a coesão e 22° para o ângulo de atrito. Os parâmetros de resistência encontrados para resíduos muito degradados foram de 4,4 kPa para a coesão e 30° para o ângulo de atrito.

Carvalho (1999) realizou ensaios de compressão triaxial em amostras de RSU remoldadas, coletadas por meio de furos de trados, até cerca de 30 m de profundidade. Considerando a deformação axial de 20%, os valores de ângulo de atrito variaram de 21° a 27° uma coesão variou de 42 a 60 kPa

É importante ressaltar que variação desses valores se deve às diferentes composições de RSU utilizadas nos vários ensaios, bem como o tipo de ensaio utilizado, os diferentes equipamentos empregados nos ensaios, além de uma ausência de procedimentos padronizados na realização destes ensaios quando realizados em resíduos.

Analisando a Tabela 29, pode-se perceber como a mudança na compactação do resíduo pode trazer um ganho na resistência do mesmo. Nos ensaios PE4 temos uma compactação muito baixa e um peso específico de 4kN/m^3 e a tensão de ruptura média é de 8 kPa. Nos ensaios PE5, ao elevar o nível de compactação e atingir o peso específico de 5kN/m^3 a tensão de ruptura média passa a ser 46 kPa, o que representa um ganho de 475%.

Ao atingir a compactação com peso específico de 6kN/m^3 a tensão de ruptura média foi de 36,1 kPa. Não houve um ganho de resistência ao aumentar a compactação do resíduo de 5kN/m^3 para 6kN/m^3 , ao contrario do que se esperava o resíduo apresentou uma resistência menor. Porém isso pode ser explicado pelo alto nível de degradação em que se encontrava o resíduo. Os ensaios PE6 foram os últimos a serem realizados e durante o tempo que se passou

entre os primeiros ensaios e esses últimos ensaios, foi possível notar que a matéria orgânica presente no resíduo estava se degradando de maneira acelerada e acredita-se que isso influenciou nos resultados obtidos. Ainda assim, se considerarmos os 4 ensaios, houve um ganho de 351% ao mudar o peso específico de 4 para 6 kN/m³. E se considerarmos somente os ensaios 9 e 10, o aumento foi de 461%.

Os ensaios PE7 atingiram um nível de compactação mais alta, com um peso específico de 7 kN/m³, e a tensão de ruptura média alcançada foi de 103,5 kPa. Houve um aumento de 1194% na tensão de ruptura média ao aumentar o peso específico de 4 kN/m³ para 7 kN/m³.

Nos ensaios PM0 retiraram-se todos os plásticos moles presentes no resíduo e escolheu manter o peso específico de 7 kN/m³ para que os resultados dos ensaios PE7 pudessem ser comparados, já que neles o teor de plástico é de aproximadamente 11,2%. Para o teor de plásticos igual a 0% a tensão de ruptura média foi de 31,1 kPa. Isso representa uma redução de 70% na resistência do resíduo, considerando todas as quatro amostras ensaiadas para peso específico de 7kN/m³. Quando eliminamos o resultado da amostra 11 a diferença fica ainda maior, a redução na resistência passa a ser de 74%. Isso confirma a teoria de que os plásticos moles atuam como fibras dentro do resíduo, aumentando a sua resistência ao cisalhamento. É importante destacar que apesar de terem sido removidos todos os plásticos moles do resíduo, ainda há a presença de outros materiais em sua composição que funcionam como fibras, como trapos, plásticos duros, papéis e outros.

Nos ensaios PM3 acrescentou-se 3% em peso de plásticos moles no resíduo e foi mantido o peso específico de 7 kN/m³ para que os resultados desses ensaios pudessem ser comparados com os ensaios PM0 e PE7. A tensão média de ruptura foi de 57,5 kPa para a amostra com 3% de plásticos moles. Quando comparamos esse resultado com o obtido pelas amostras com 0% de plásticos moles, há um aumento de 85% na tensão de ruptura média. Ao confrontarmos os resultados desses ensaios com os ensaios PE7, percebemos que há uma redução de 44% na resistência à tensão de ruptura. Isso mostra que a presença dos plásticos moles altera as características do resíduo e confirma a teoria de que esse material atua como um tipo de fibra, aumentando a sua resistência ao cisalhamento.

Por fim, nos ensaios PM6 adicionaram-se plásticos moles no resíduo até atingir um teor de 6% em massa e as amostras continuaram sendo compactadas no peso específico de 7 kN/m³.

Para o teor de plásticos igual a 6% a tensão de ruptura média foi de 48,3 kPa. Pode-se perceber que a tensão de ruptura média atingida pela amostra com 6% de plástico mole foi menor do que a tensão atingida pela amostra com 3% de plástico mole, com uma redução foi de 16%. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de nos ensaios com 3% uma das amostras ter apresentado uma tensão de ruptura muito elevada, devido a presença de trapos na área da sua superfície de ruptura, o que acabou elevando o valor da média. Nas amostras com 6% de plástico, o ensaio 23 também apresentou um resultado diferente das outras amostras, com uma tensão de ruptura mais baixa, o que diminuiu o valor da tensão de ruptura média para esses ensaios.

Quando comparamos o resultado dos ensaios com 6% de plástico mole com o obtido pelas amostras com 0%, há um aumento de 55% na tensão de ruptura média. Ao confrontarmos os resultados desses ensaios com os ensaios PE7, percebemos que há uma redução de 53% na resistência à tensão de ruptura. Novamente confirmando a teoria de que os plásticos moles atuam como fibras dentro do resíduo, aumentando a sua resistência ao cisalhamento.

Por meio de da Tabela 29 pode-se observar os parâmetros de resistência obtidos por meio de da linha de tendência traçada entre os pontos das curvas dos gráficos coesão *versus* tangente do ângulo de atrito, apresentadas anteriormente.

Para a compactação com o peso específico de 4 kN/m³ os parâmetros de resistência obtidos foram um ângulo de atrito de 27,5° para coesão de 0,25 kPa e 1,5° para a coesão de 0,5 kPa.

Na compactação com peso específico de 5 kN/m³ os parâmetros de resistência obtidos foram um ângulo de atrito de 32,4° para coesão de 0,25 kPa, 22,7° para a coesão de 0,5 kPa e 3,1 para coesão de 1 kPa.

Na compactação com peso específico de 6 kN/m³, os parâmetros de resistência obtidos da linha de tendência foram um ângulo de atrito de 37° para coesão de 0,25 kPa, 29,4° para a coesão de 0,5 kPa e 14,3 para coesão de 1 kPa.

Para a compactação com peso específico de 7 kN/m³, os parâmetros de resistência obtidos da linha de tendência foram um ângulo de atrito de 36,3° para coesão de 0,25 kPa, 32,5° para a

coesão de 0,5 kPa, 24,8° para coesão de 1 kPa, 17,1° para coesão de 1,5 kPa, 9,4° para coesão de 2 kPa e 1,7° para coesão de 2,5 kPa.

Nos ensaios PM0 mudou-se o teor de plásticos moles para 0% e a compactação foi realizada com peso específico de 7 kN/m³. Os parâmetros de resistência obtidos foram um ângulo de atrito de 28,3° para coesão de 0,25 kPa e 17,6° para a coesão de 0,5 kPa.

Nos ensaios PM3 o teor de plásticos moles era 3% e a compactação foi realizada com peso específico de 7 kN/m³. Os parâmetros de resistência obtidos foram um ângulo de atrito de 35,6° para coesão de 0,25 kPa, 28,6° para a coesão de 0,5 kPa, 14,5° para coesão de 1 kPa e 0,5° para coesão de 1,5 kPa.

Para os ensaios com teor de plásticos moles igual a 6% e a compactação foi realizada com peso específico de 7 kN/m³, os parâmetros de resistência obtidos foram um ângulo de atrito de 32,5° para coesão de 0,25 kPa, 24,9° para a coesão de 0,5 kPa e 9,7° para coesão de 1 kPa.

5 Conclusões

O objetivo principal desse trabalho foi estudar e analisar os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos urbanos e as suas propriedades físicas, avaliando a relação que a compactação e o aumento peso específico dos resíduos têm com os parâmetros de resistência dos RSU e o efeito de reforço causado pela presença de plásticos moles nos resíduos. Para isso, foi construído um equipamento de grande dimensão desenvolvido por Ribeiro (2007), no qual eram realizados ensaios de talude de RSU e obtinha-se a tensão e a superfície de ruptura. Em seguida, eram feitas retroanálises dessas condicionantes por meio de do uso de *software* de estabilidade de maciços e, assim, eram determinados os parâmetros de resistência.

Em relação à composição gravimétrica dos RSU, conclui-se que houve uma mudança nas características dos resíduos descartado pela população de Viçosa em relação ao ano de 2007, havendo uma diminuição do teor de matéria orgânica e papel e papelão e aumento na quantidade de plásticos descartados. Apesar dessa mudança, a composição gravimétrica encontrada no resíduo do município está coerente com os valores encontrados para o cenário estadual.

De modo geral, pode-se perceber que os menores deslocamentos aconteceram nas amostras que tinham um percentual nulo ou baixo de plásticos moles, o que mostra que a presença desse material atua como uma fibra que faz com que o resíduo ganhe uma capacidade de se deformar sem atingir a ruptura rapidamente. Nota-se também que as maiores deformações foram alcançadas pelas amostras que atingiram tensões de ruptura maiores.

Os resultados mostram que a compactação dos resíduos é um passo importante a ser adotado nos aterros sanitários, gerando um aumento na resistência dos taludes de resíduo.

Os resultados dos ensaios com amostras de resíduos que tinham diferentes teores de plásticos moles mostram que a presença desse material altera as características dos resíduos e confirma a teoria de que esse material atua como um tipo de fibra, aumentando a sua resistência ao cisalhamento. Porém, deve-se ressaltar o grande impacto ambiental que o descarte de sacos plásticos representa, já que em sua maioria esse material é usado somente uma vez e, se descartado incorretamente, pode gerar problemas como: entupimentos nas passagens de água nos bueiros e córregos, gerando alagamentos; poluição dos mares e rios, se tornando altamente prejudicial à vida dos animais; além de a matéria-prima utilizada em sua fabricação, o polietileno, é uma substância não renovável, originada a partir do petróleo.

Como resultados das retroanálises utilizando o *software* foram obtidos os parâmetros de resistência dos RSU. Os valores encontrados para a coesão variaram de 0 a 2,5 kPa e o ângulo de atrito variou de 0° a 43,9°.

Os parâmetros de resistência se aproximam dos valores recomendados por Bouazza e Wojnarowicz, (1999, apud BOSCOV, 2008), com valores entre 25° e 35° para o ângulo de atrito considerando a coesão nula, e Sanchez-Alciturri et al. (1993, apud BOSCOV, 2008) que sugerem valores de ângulo de atrito 22,5° e 27° para uma coesão igual a 0 kPa. Porém os resultados encontrados nesse trabalho, obtidos por meio de ensaios de estabilidade de talude foram bastante divergentes com os apresentados na literatura nacional, uma vez que Azevedo (2005 apud RIBEIRO, 2007) recomenda os valores de ângulo de atrito igual a 28° e coesão igual 10 kPa para projetos de aterros sanitários, Benvenuto e Cunha (1991) indicam como ângulo de atrito e coesão os valores de 22° e 13,5 kPa, respectivamente, em condições de propressão crítica. Abreu (2005) obteve como resultados 13,7 kPa para a coesão e 22° para o

ângulo de atrito, em resíduos com 2 anos de idade. Ribeiro (2007) sugere a adoção de 12 kPa para a coesão e 30° para o ângulo de atrito. Martins (2006) obteve como resultado o valor de 35,6 kPa para a coesão e 15,7° para o ângulo de atrito em resíduos com fibras. Carvalho (1999) apresentou valores variando de 42 a 60 kPa para a coesão e 21° a 27° para o ângulo de atrito.

O equipamento desenvolvido para realização de ensaios de talude de RSU é simples de ser construído e os parâmetros de resistência podem ser obtidos facilmente por meio de retroanálise de estabilidade de talude usando um programa computacional, porém seus resultados devem continuar sendo estudados, para que se tenha certeza que os parâmetros de resistência calculados representam a realidade e são confiáveis.

Por fim, por meio de do ensaio teste usando o compressor de ar foi possível perceber que a forma de carregamento interfere nos gráficos obtidos, embora os resultados de tensão de ruptura e os parâmetros de resistência não tenham sofrido interferência, sendo condizentes com os resultados encontrados com o macaco hidráulico.

A grande dificuldade no estudo e na interpretação de resultados de ensaios com resíduos sólidos urbanos está associada com a heterogeneidade do material, o qual apresenta diferentes tipos e dimensões de constituintes, presença de componentes que podem degradar com o tempo, etc. Além disso, a adoção de modelos teóricos e técnicas de ensaios de campo e de laboratório, desenvolvidos para solos podem não dar resultados confiáveis quando aplicados para resíduos sólidos urbanos. Até o presente, as propriedades físicas e mecânicas dos RSU estão sendo estudadas estendendo-se para esses materiais os mesmos conceitos da Engenharia Geotécnica desenvolvidos para solos. Existem várias limitações no uso dessa aproximação, pois o RSU possui diferenças importantes em relação aos solos. Isto aponta para a necessidade de desenvolvimento de novas teorias ou adaptação das teorias existentes de sorte a ter-se modelos realistas que possam traduzir o complexo comportamento dos resíduos sólidos urbanos.

5.1 Sugestões

Com o desenvolvimento deste trabalho, algumas sugestões para futuros trabalhos podem ser apontadas:

- Sugere-se que o ensaio de estabilidade de talude tenha seus resultados comparados com algum método de ensaio mais tradicional, como o ensaio de cisalhamento direto de grandes dimensões, para que se possa comprovar que os parâmetros de resistência calculados nas retroanálises representam a realidade e são confiáveis;
- O desenvolvimento de estudos variando a composição gravimétrica dos resíduos, estudando o comportamento de cada material contido no lixo, e como esses materiais interferem na resistência do resíduo;
- A degradação do resíduo em algumas semanas parece ter afetado a sua resistência. Assim, ensaios com resíduos de diferentes idades, determinando assim parâmetros de resistência em função da idade dos resíduos são importantes;
- Na bibliografia, o peso específico dos RSU nos aterros sanitários podem atingir valores muito altos, por isso é importante que mais ensaios sejam realizados para compactações nas quais o peso específico seja maior que 7 kN/m^3 .

Referências

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. 2020. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 27 de junho de 2021.

ABREU, A. E. S. Investigação geofísica e resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades. 250p. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2015.

ALMEIDA, J. R. Estudo do Comportamento de Barreira Capilar em Aterros de Resíduos. 152p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2011.

ALMEIDA, J. R. Proposta de índice de avaliação de aterros de resíduos desativados a partir do potencial poluidor do lixiviado. 190p. Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 13896. Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2010, 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004, 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004, 25 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992, 7 p.

BATISTA, H. E. Desenvolvimento de diretrizes para monitoramento geotécnico e plano de contingência/emergência em aterros sanitários. 146 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 2010.

BENVENUTO, C.; CUNHA, M. A. Escorregamento em massa de lixo no Aterro Sanitário Bandeirantes em São Paulo, SP. II Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos - REGEO'91, Rio de Janeiro, Nov. de 1991.

BORGATTO, A. V. A. – Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos. 157 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

BORGATTO, A. V. A. Estudo das propriedades geomecânicas de resíduos sólidos urbanos pré-tratados. 306p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2010.

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia Ambiental, Oficina de Textos, 2008, São Paulo, 248 p.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2019. Brasília: SNS/MDR, 2020. 244 p. : il.

BRAY, J. D. ZEKOS; D. KAVAZANJIAN JR., E.; ATHANASOPOULOS, G. A.; RIEMER, M. F. Shear Strength of Municipal Solid Waste. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, 2009, p. 709-722.

CARVALHO, M. F. Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos. 300p. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1999.

DACIOLO, L. V. P., CORREIA, N. S., CHRISTOFORO, A. L. Análises estatísticas dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e peso específico de Resíduos Sólidos Urbanos presentes na literatura. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - Cobramseg 2018, 2018, Salvador. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2018.

DIXON, N; JONES, D.R.V. Engineering Properties of Municipal Solid Waste. Geotextiles and Geomembranes, 2005, v.23, p. 205–233.

FUCALE, S. P.; JUCA, J. F. T. Estudo da resistência a penetração dinâmica (SPT) em aterros de resíduos sólidos urbanos. XXVIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, 2002. Cancun, México.

Fundação Estadual do Meio Ambiente. Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do Estado de Minas Gerais / Fundação Estadual do Meio Ambiente. - Belo Horizonte: Feam, 2017. 25 p.

HYPEVERDE. Diferenças entre Lixão, Aterro Controlado e Aterro Sanitário. Disponível em: <<https://www.hypeverde.com.br/diferencas-entre-lixao-aterro-controlado-e-aterrosanitario>>. Acessado em: 02 de novembro de 2019.

IBGE. Cidades e Estados, 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/vicosa.html>>. Acesso em 17 de maio de 2021.

LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20072010/2010/lei/l12305.htm> . Acessado em: 09 de setembro de 2019.

MARANGON, M. - Tópicos em geotecnia e obras de terra - Notas de Aula. Universidade Federal de Juiz de Fora, curso de Engenharia Civil 2013.

MARTINS, H. L. Avaliação de resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaio de cisalhamento direto em equipamento de grandes dimensões. 131 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 2006.

NASCIMENTO, J. C. F. Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos. 160p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de São Paulo, EESC/USP, São Carlos, 2007.

OLIVEIRA, A. C. N. – Parâmetros de resistência de resíduos sólidos para projetos de aterros sanitários. Juiz de Fora: UFJF, 2017, 80 p. Trabalho Final de Curso de Engenharia Civil.

OLIVEIRA, D. A. F. – Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos. 154 p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 2002.

REMÉDIO, F. H. Análise de Estabilidade de Taludes de Aterro de Resíduos Urbanos Utilizando Parâmetros Geotécnicos de Propostas Bibliográficas e Correlações com Nspt. 131p. Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade Estadual Paulista, UEP, São Paulo, Rio Claro, 2014.

RIBEIRO, A. G. C. – Determinação de parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de retro-análises de testes em laboratório. 100 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2007.

SILVA, M. L. D. Cidade de Viçosa (MG): a dinâmica centro-periferia. 149p. Dissertação de Mestrado em Geografia, Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Espírito Santo, 2014.

SUZIKI, D. K. Verticalização de aterros sanitários por meio de reforço com geogrelhas e diques periféricos alteados pelo método de montante. 165p. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

TEIXEIRA, M. C. Previsão e Monitoramento de Recalques em Aterros Sanitários/ Estudo de Casos: Central de Resíduos de Recreio – Minas do Leão/RS e São Leopoldo/RS. 217p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, 2015.

TODA MATÉRIA. Aterro Sanitário. Disponível em: < <https://www.todamateria.com.br/aterro-sanitario/>>. Acessado em: 02 de novembro de 2019.