

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Resistência de resíduos sólidos municipais sintéticos em função da variação  
do teor de matéria orgânica**

Maria Clara Moreira Fort  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**MARIA CLARA MOREIRA FORT**

**Resistência de resíduos sólidos municipais sintéticos em função da variação  
do teor de matéria orgânica**

Dissertação apresentada à 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 Lopes Ferraz

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

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

T

F736r  
2025 Fort, Maria Clara Moreira, 1995-  
Resistência de resíduos sólidos municipais sintéticos em  
função da variação do teor de matéria orgânica / Maria Clara  
Moreira Fort. – Viçosa, MG, 2025.  
1 dissertação eletrônica (78 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Rejane Nascentes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Civil, 2025.

Referências bibliográficas: f. 75-78.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.120>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Aterro sanitário. 2. Gestão integrada de resíduos sólidos.  
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

**MARIA CLARA MOREIRA FORT**

**Resistência de resíduos sólidos municipais sintéticos em função da variação do teor de matéria orgânica**

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

APROVADA: 27 de agosto de 2025.

Assentimento:

---

Maria Clara Moreira Fort  
Autora

---

Rejane Nascentes  
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 27/03/2026 às 20:32:49 e pela orientadora em 31/03/2026 às 14:51:03. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **BSTV.NP4A.ION7** e clique no botão 'Validar documento'.

Dedico este trabalho a Deus, autor e sustentáculo de toda a criação;  
ao Renato e Sofia, fontes diárias de amor e inspiração e  
à minha avó Rita (*in memoriam*), principal responsável por eu ser quem hoje sou.

## AGRADECIMENTOS

Aqui estão reunidos os alicerces acima dos quais este trabalho, escrito a muitas mãos, nasceu e que o possibilitaram reverberar em avanços profissionais, pessoais e científicos.

A Deus, pelo seu amor infinito, providência, inspirações e cuidado em cada detalhe desde o momento em que plantou este sonho em meu coração. Agradeço também à Nossa Senhora e São José, pelas incontáveis graças que todos os dias recebo por suas intercessões.

Ao Renato, sou grata por me dar todo suporte necessário, seja financeiro, emocional ou operacional, para desenvolver este trabalho. Agradeço por estar ao meu lado nos dias mais difíceis e escuros, sem você com certeza este trabalho não existiria. A Sofia, por dilatar todos os dias meu coração e sua capacidade de amar e me forçar a ser uma pessoa melhor.

Aos meus pais, Elba e Nelson, que me deixaram no decorrer do trabalho, agradeço por me possibilitarem a vida, pelo amor e torcida constante. Sei que era da vontade de ambos que eu finalizasse esta dissertação e que de onde estiverem se alegrarão.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

À Universidade Federal de Viçosa, por acolher e tornar possível tanto este quanto meus outros trabalhos, nestes mais de 10 anos de vínculo institucional.

A minha orientadora, Professora Rejane Nascentes, por não ter me deixado desistir e motivado a continuar, mesmo quando tudo se mostrava contrário ao sucesso. Sua motivação, ânimo e dedicação foram essenciais para tornar este trabalho possível.

Ao Professor Roberto Ferraz pela coorientação e ao técnico Marcelo Sebastião de Souza, do Laboratório de Geotecnia da Engenharia Civil, que com sua experiência e paciência me forneceu um auxílio ímpar na execução dos ensaios.

Aos professores do mestrado, os quais foram muito importantes em minha formação profissional por todo conhecimento compartilhado.

“Deus tomou o homem e o colocou no jardim do Éden para o cultivar e o guardar.”  
Gn 1, 15

## RESUMO

FORT, Maria Clara Moreira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2025. **Resistência de resíduos sólidos municipais sintéticos em função da variação do teor de matéria orgânica.** Orientadora: Rejane Nascentes. Coorientador: Roberto Lopes Ferraz.

Para se avaliar a estabilidade dos taludes de resíduos sólidos urbanos (RSU) é primordial a utilização de estimativas confiáveis dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos resíduos. Frente aos diversos desafios encontrados na experimentação dos RSU, esta dissertação teve como objetivo propor o uso de resíduos sólidos municipais sintéticos (RSMS) em substituição dos RSU, verificando se os RSMS simulam adequadamente o comportamento de RSU em ensaios geotécnicos. Foi dada ênfase na avaliação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, coesão e ângulo de atrito, em função da variação do teor de matéria orgânica. Para tanto, a partir da gravimetria da cidade de Viçosa, MG, foram preparadas três misturas de RSMS (MO01, MO02 e MO03), com teor de matéria orgânica compostável (MOC) de 45,1%, 35,0% e 29,4%, respectivamente, baseadas na composição. As amostras foram submetidas aos ensaios de compactação na energia de proctor normal e de cisalhamento triaxial não drenado (CIU). No ensaio CIU os corpos de prova foram moldados com pesos específicos entre 5,48 e 5,87 kN/m<sup>3</sup>, padronizados a 60% de umidade conforme curvas de compactação obtidas no ensaio de compactação. Avaliaram-se também o comportamento nos diagramas de tensão-deformação, poropressões, além do comportamento dos parâmetros coesão e ângulo de atrito para tensões totais e efetivas com a deformação. Os resultados indicam que o teor de matéria orgânica influencia diretamente o peso específico seco máximo, que foi de 6,03, 5,79 e 5,53 kN/m<sup>3</sup> para MO01, MO02 e MO03, respectivamente. Observou-se também que a constituição de RSMS proposta neste trabalho não apresentou pico de resistência ao cisalhamento, manifestando inclusive comportamento ascendente nas curvas tensão-deformação em maiores taxas de deformação, conforme já previsto para RSU na literatura. Relata-se que a composição gravimétrica e presença de materiais fibrosos influencia na resistência ao cisalhamento, que também é dependente da deformação. Foram encontrados em todos os tratamentos altos valores do ângulo de atrito efetivo (58° a 69°, para 15% de deformação axial) e coesão nula para MO01 e MO03, semelhante a trabalhos anteriores que realizaram testes CIU em larga escala com RSU. Finalmente, conclui-se que o comportamento qualitativo das amostras se revelou muito semelhante ao dos RSU reais, demonstrando a eficácia do método para

simular esses resíduos para utilização em testes geotécnicos de escala convencional.

Palavras-chave: aterros sanitários, parâmetros de resistência, coesão, ângulo de atrito, RSU

## ABSTRACT

FORT, Maria Clara Moreira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2025. **Resistance of synthetic municipal solid waste as a function of variation in organic matter content.** Adviser: Rejane Nascentes. Co-adviser: Roberto Lopes Ferraz.

To assess the stability of municipal solid waste (MSW) slopes, it is essential to use reliable estimates of the shear strength parameters of the waste material. Given the various challenges encountered in MSW experimentation, this dissertation aims to propose the use of synthetic municipal solid waste (SMSW) as a substitute for MSW, verifying whether the synthetic material adequately represents the behavior of Brazilian MSW. Emphasis was placed on evaluating the shear strength parameters, cohesion, and friction angle, in relation to variations in organic matter content. For this purpose, based on the gravimetric composition of the MSW from Viçosa, MG, three SMSW mixtures were prepared (MO01, MO02, and MO03), with compostable organic matter (COM) contents of 45.1%, 35.0%, and 29.4%, respectively. The samples were subjected to standard Proctor compaction and undrained triaxial shear (CIU) tests. In the CIU test, the specimens were molded with unit weights between 5.48 and 5.87kN/m<sup>3</sup>, standardized at 60% moisture content according to the compaction curves obtained from the standard Proctor test. The stress-strain behavior, pore pressures, and the behavior of cohesion and friction angle parameters for total and effective stresses with deformation were also evaluated. The results indicate that the organic matter content directly influences the maximum dry unit weight, which was 6.03, 5.79, and 5.53kN/m<sup>3</sup> for MO01, MO02, and MO03, respectively. It was also observed that the SMSW composition proposed in this work did not present a strength peak, showing even an upward trend in the stress-strain curves at higher strain rates, as already reported for MSW in the literature. It is noted that the gravimetric composition and the presence of fibrous materials influence shear strength, which is also strain-dependent. High values of effective friction angle (58° to 69°, for 15% axial strain) and zero cohesion were found in all treatments for MO01 and MO03, similar to previous large-scale CIU tests conducted with MSW. Finally, it is concluded that the qualitative behavior of the samples was very similar to that of real MSW, demonstrating the effectiveness of the method for simulating these wastes in conventional scale geotechnical tests.

Keywords: sanitary landfills, strength parameters, cohesion, friction angle, MSW

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fotografia 1 - Deslizamento no aterro sanitário de Fazenda Rio Grande-PR. ....	21
Fotografia 2 - Deslizamento em lixão de Padre Bernardo-GO. ....	21
Fotografia 3 - Componentes do RSMS de Dixon <i>et al</i> (2008) .....	39
Fotografia 4 - Processo de preparação das amostras de RSMS de Athanasopoulos <i>et al</i> (2008) .....	39
Fotografia 5 - Amostra de RSMS de Hettiarachchi e Thani (2011) .....	41
Fotografia 6 - RSMS utilizado por Pulat e Yukselen-Aksoy (2013) .....	42
Fotografia 7 - Tamanho e forma das partículas do Resíduo Sólido Municipal Sintético (RSMS) após preparo para ensaios laboratoriais.....	51
Fotografia 8 - Mistura final dos materiais - amostras MO01 .....	52
Fotografia 9 - Frações gravimétricas utilizadas nos ensaios: MO01, MO02 e MO03	53
Fotografia 10 - Corpo de prova de RSMS obtido por compressão estática – Mistura MO01 .....	55
Fotografia 11 - Corpo de prova na câmara triaxial antes da realização do ensaio CIU .....	56
Fotografia 12 - Corpo de prova MO02 ao final do cisalhamento .....	57
Gráfico 1 - Composição gravimétrica brasileira.....	23
Gráfico 2 - Curva Teórica de compressibilidade proposta por Grisolia e Napoleoni (1996).....	30
Gráfico 3 - Representação da curva tensão-deformação com interação entre as componentes de atrito e tração dos RSU.....	34
Gráfico 4 - Caminhos de tensão de Vilar e Carvalho (2004). ....	36
Gráfico 5 - Curvas de compactação dos tratamentos MO01, MO02 e MO03 .....	59
Gráfico 6 - Diagrama tensão desviadora-deformação axial para MO01.....	60
Gráfico 7 - Diagrama tensão desviadora-deformação axial para MO02.....	60
Gráfico 8 - Diagrama tensão desviadora-deformação axial para MO03.....	61
Gráfico 9 - Diagrama poropressão-deformação axial para MO01 .....	62
Gráfico 10 - Diagrama poropressão-deformação axial para MO02 .....	63
Gráfico 11 - Diagrama poropressão-deformação axial para MO03 .....	63
Gráfico 12 – Envoltória de resistência em termos de tensão efetiva para MO01 .....	64
Gráfico 13 - Envoltória de resistência em termos de tensão total para MO01.....	65

Gráfico 14 - Envoltória de resistência em termos de tensão efetiva para MO02.....	65
Gráfico 15 – Envoltória de resistência em termos de tensão total para MO02.....	66
Gráfico 16 – Envoltória de resistência em termos de tensão efetiva para MO03.....	66
Gráfico 17 – Envoltória de resistência em termos de tensão total para MO03.....	67
Gráfico 18 - Ângulo de atrito efetivo versus deformação.....	69
Gráfico 19 - Ângulo de atrito total versus deformação .....	69
Gráfico 20 - Coesão efetiva versus deformação .....	70
Gráfico 21 - Coesão total versus deformação .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição gravimétrica dos resíduos de Viçosa e de Minas Gerais.....	47
Tabela 2 - Composição gravimétrica dos tratamentos MO01, MO02 e MO03 .....	48
Tabela 3 - Composição gravimétrica final dos tratamentos MO01, MO02 e MO03...	49
Tabela 4 - Pesos específicos à umidade de 60%.....	56
Tabela 5 - Parâmetros de compactação dos RSMS .....	58
Tabela 6 - Parâmetros da resistência ao cisalhamento do RSMS .....	67
Tabela 7 - Ajuste estatístico da variação do ângulo de atrito x deformação .....	71

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduo Sólido Urbano
RSMS	Resíduo Sólido Municipal Sintético

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Resíduos sólidos urbanos e sua disposição em aterros sanitários</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Propriedades Físicas dos RSU .....</b>	<b>22</b>
2.2.1	Composição gravimétrica .....	22
2.2.2	Teor de umidade.....	24
2.2.3	Peso específico .....	26
<b>2.3</b>	<b>Propriedades Mecânicas dos RSU .....</b>	<b>29</b>
2.3.1	Compressibilidade .....	30
2.3.2	Resistência ao cisalhamento .....	32
<b>2.4</b>	<b>Determinação das propriedades geotécnicas dos resíduos .....</b>	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>47</b>
<b>3.1</b>	<b>Preparação dos Resíduos Sólidos Municipais Sintéticos (RSMS)..</b>	<b>49</b>
<b>3.2</b>	<b>Testes Geotécnicos .....</b>	<b>54</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>58</b>
<b>4.1</b>	<b>Ensaio de compactação .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio Triaxial .....</b>	<b>60</b>
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>75</b>

## 1 . INTRODUÇÃO

O crescimento da geração de resíduos *per capita*, juntamente com o crescimento populacional, amplia cada vez mais os problemas relacionados à destinação e disposição dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Na última década, de 2012 a 2022, a geração total anual de RSU no Brasil teve um incremento de mais de 19 mil toneladas ao ano, o que equivale a um aumento percentual de 30% na geração de resíduos (ABRELPE, 2012; ABRELPE, 2022).

A gestão dos RSU no Brasil, segundo a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, ABREMA (2024), está atualmente em uma fase de transição: saindo de um sistema quase exclusivo de disposição inadequada para um modelo mais sustentável, ao incorporar mais formas de reciclagem e tratamento, além de métodos mais eficientes no gerenciamento do RSU.

Neste último levantamento, destacou-se o fato que, antes, era mais comum observar iniciativas de reciclagem apenas para materiais secos, às quais agora vêm se somando a reciclagem dos materiais orgânicos e aproveitamento energético do biogás (ABREMA, 2024).

Sobre a destinação final dos resíduos sólidos urbanos, a disposição em aterros sanitários foi da ordem de 50% de todos os resíduos gerados em 2023. Porém, ainda cerca de 40% dos resíduos sólidos brasileiros receberam um destino final não ambientalmente adequado naquele ano, com aproximadamente 35% sendo dispostos em lixões, aterros controlados, valas, vazadouros ou unidades similares e cerca de 5% sendo queimados a céu aberto, principalmente em localidades rurais ABREMA (2024).

Dessas modalidades de disposição sobre o solo citadas, apenas os aterros sanitários podem ser considerados uma forma de disposição final ambientalmente adequada. Isso, pois, são apenas eles que possuem sistemas projetados para o controle da migração de contaminantes oriundos dos resíduos e seus subprodutos para o ar, o solo e as águas, tanto superficiais quanto subterrâneas, além dos programas de monitoramento desses sistemas.

Diante da demanda crescente por áreas para disposição de resíduos, da limitação de áreas aptas para construção de novos aterros sanitários e dos passivos ambientais deste tipo de empreendimento, observa-se como resultado

uma busca de maior vida útil destes, seja prevendo grandes alturas de taludes já na concepção inicial ou fazendo projetos para ampliar os aterros em operação.

Segundo Cardim (2008), isso torna o cenário ainda mais preocupante, uma vez que o alteamento de pilhas compactadas de aterros já existentes é feito muitas vezes segundo correlações empíricas de escala não representativa. Além do fato de que muitas vezes essas correlações ignoram a influência do tempo de disposição nas propriedades dos resíduos e as diferenças de características de composição, umidade e permeabilidade entre os dados.

Ademais, embora os aterros sanitários sejam utilizados de forma sistemática como forma de disposição ambientalmente adequada de resíduos no Brasil, é notável a falta de parâmetros e critérios de projeto apropriados para as condições dos RSU brasileiros. Uma das origens disto são as diversas dificuldades para se determinar em laboratório as propriedades de interesse dos resíduos sólidos para o projeto de aterro sanitário.

Muito embora na prática de projeto de aterros sanitário recorra-se a critérios e modelos teóricos da Mecânica dos Solos Clássica, adaptados à geomecânica dos resíduos, há logo de início a incompatibilidade de escala entre os RSU e os equipamentos geotécnicos convencionais, sendo quase imperativa a necessidade de adaptação dos equipamentos a escalas maiores.

Outrossim, em consequência da grande heterogeneidade do material, há também uma grande variação até entre as amostras obtidas dentro de um mesmo estudo, o que torna complicado quantificar a contribuição de cada elemento individualmente para o comportamento do global dos RSU.

Por fim, não se pode ignorar as preocupações em relação à saúde e segurança dos pesquisadores que são expostos à riscos de ordem física e biológica ao trabalhar com resíduos sólidos urbanos.

O principal problema da falta de dados técnico-científicos para as especificidades dos RSU brasileiros é que as principais propriedades mecânicas dos resíduos, compressibilidade e resistência, são muito sensíveis às variações das características dos resíduos, que por sua vez, variam muito entre regiões e países.

A fim de superar esses dilemas, tem surgido em diferentes locais a alternativa promissora de trabalhar com o que alguns pesquisadores nomeiam como resíduos sólidos municipais sintéticos (RSMS). Estes são materiais

preparados em laboratório a partir da mistura de diferentes componentes, visando simular durante ensaios geotécnicos convencionais o comportamento dos resíduos sólidos urbanos.

Dentre as vantagens do método estão a possibilidade de controle da composição, a redução das incertezas, a viabilização de repetições e realização de ensaios em escala convencional, além de suprir as questões de segurança sanitária.

Porém, mesmo em âmbito internacional, existem diversas lacunas sobre o uso dos RSMS e sua validação para simulação de RSU. Tampouco há alguma metodologia definida, seja para a realização dos ensaios geotécnicos ou até para a forma de construção e constituição das amostras.

Outro ponto a ser destacado é que, de acordo com a Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, conhecida por Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a redução, reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e o aproveitamento energético devem ter prioridade em relação à disposição final em aterros (Brasil, 2010).

De acordo com a gravimetria estimada pela ABRELPE (2020), em média 46,88% em massa dos RSU brasileiros é composto por matéria orgânica compostável. Logo, tanto políticas de conscientização contra o desperdício com foco na redução da geração, quanto o reaproveitamento de parte desta fração pela compostagem ou biodigestão, já seria um ponto importante para o aumento da vida útil dos aterros, que passariam a não mais receber esta parcela dos resíduos.

Além disso, com as modificações nos hábitos de consumo e avanço do desenvolvimento econômico do país, espera-se encontrar nos próximos anos uma redução da porcentagem da matéria orgânica na composição gravimétrica brasileira.

Diante do exposto, nota-se a importância do estudo das propriedades mecânicas dos RSU locais com intuito de subsidiar melhores e mais confiáveis análises de estabilidade e recalque para taludes dos aterros sanitários.

Este trabalho se propôs, portanto, a responder à seguinte questão central: em que medida os resíduos sólidos municipais sintéticos, preparados a partir de composições gravimétricas representativas, conseguem reproduzir o

comportamento mecânico dos RSU reais, sobretudo em função da variação do teor de matéria orgânica?

Com essa delimitação, a dissertação pretende não apenas contribuir para a compreensão do comportamento geotécnico dos resíduos, mas também fornecer subsídios práticos para o desenvolvimento de métodos experimentais mais acessíveis, aplicáveis ao contexto brasileiro de gestão e projeto de aterros sanitários.

## 2 . REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo foram abordadas as características físicas e mecânicas dos resíduos sólidos urbanos, bem como as implicações das propriedades geotécnicas de compressibilidade e resistência dos mesmos na prática de disposição sobre o solo. Ao final, foram discutidas as dificuldades dos programas experimentais utilizando RSU e a promissora utilização de RSMS em pesquisas sobre resíduos sólidos urbanos.

### 2.1 . Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e sua disposição em aterros sanitários

As atividades humanas, domésticas ou econômicas, muitas vezes geram resíduos ou subprodutos. Em termos normativos, a ABNT (2010), em consonância com a Resolução CONAMA nº 404/2008, define os resíduos sólidos urbanos (RSU) como aqueles:

provenientes de domicílios, serviços de limpeza urbana, pequenos estabelecimentos comerciais, industriais e de prestação de serviços, que estejam incluídos no serviço de coleta regular de resíduos e, que tenham características similares aos resíduos sólidos domiciliares (ABNT, 2010, p. 10)

No ano de 2023, estima-se que foram geradas no Brasil um total de 80.957.467 toneladas de resíduos sólidos urbanos, das quais 93,4% foram coletadas, seja pelos serviços públicos ou catadores informais (ABREMA, 2024).

Entretanto, destaca-se que esse percentual de coleta é desigualmente distribuído entre as regiões brasileiras, com Sul, Sudeste e Centro-Oeste acima da média nacional, com 97,2%, 98,8% e 95,2% dos RSU coletados, respectivamente, e Norte e Nordeste com 83% dos resíduos coletados (ABREMA, 2024).

Sobre a gestão dos RSU, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), preconiza no Brasil a seguinte ordem de prioridade das ações: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Brasil, 2010).

Portanto, segundo a legislação vigente, deveriam ser encaminhados para os aterros sanitários apenas os rejeitos, isto é, apenas aqueles materiais que

restaram após esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis (Brasil, 2010).

Colomer-Mendoza *et al* (2013) defendem que os aterros sanitários são fundamentais para a maioria das estratégias e gestão de resíduos, por ser um método relativamente simples e econômico de disposição final, quando comparados à incineração, por exemplo.

Ademais, os mesmos autores ainda destacam que por mais que os programas de gerenciamento foquem na minimização da geração e na reciclagem, e isso reduza os volumes de resíduos a serem efetivamente tratados, no final das contas os aterros sanitários ainda se fazem necessários para, pelo menos, acomodar os rejeitos.

Os aterros sanitários são um meio de disposição final de RSU onde se utiliza dos critérios de engenharia para confinar e reduzir os resíduos à menor área e menor volume possíveis, tendo como objetivo minimizar os impactos ambientais e não causar danos à saúde pública (ABNT, 2010).

Na posição diametralmente oposta encontram-se os lixões, que são áreas de disposição desordenada de resíduos sobre o solo sem qualquer controle qualitativo ou quantitativo dos resíduos lançados.

Esta prática tem graves consequências ambientais, como contaminação do solo, do ar e das águas, superficiais e subterrâneas, depreciação da paisagem, além dos efeitos diretos de cunho social e à saúde humana devido à presença e convívio de catadores e animais naquele meio insalubre (Leite *et al*, 2019).

Por sua vez, entre essas duas formas de disposição, existem ainda os aterros controlados, que são locais onde pode haver algum controle operacional e ambiental, como, por exemplo, controle de acesso de pessoas, balança rodoviária e coleta parcial de gases e lixiviados.

Entretanto, Leite *et al* (2019) destacam que não há nenhum rigor ou parâmetros balizadores desses sistemas de controle, o que faz com que os aterros controlados, embora possuam na nomenclatura a palavra “aterro”, se assemelhem na prática mais aos lixões do que aos aterros sanitários de fato.

Para os aterros sanitários, a ABNT (2010) exige desde o cumprimento de uma lista de critérios para a seleção da área, passando pelo projeto e

monitoramento de sistemas de proteção ambiental e indo até o planejamento do encerramento, contemplando o uso futuro da área após o fim da vida útil do aterro.

Os sistemas de proteção ambiental exigidos nos aterros sanitários são: impermeabilização da base e das laterais; sistema de manejo de lixiviados; sistema de drenagem e tratamento de gases; sistema de drenagem superficial; sistema de cobertura; sistema de drenagem das águas pluviais; controle dos acessos e isolamento do aterro e sistemas de monitoramento ambiental e de operação (Brasil, 2010).

Boscov (2008) comenta que os aterros de resíduos são obras que começaram a ser implantadas no campo da Geotecnia a partir da década de 1970, com os aterros sanitários de Bandeirantes e do Sítio São João, ambos em São Paulo, figurando como os pioneiros do Brasil e tendo suas construções iniciadas somente a partir de 1990.

A mesma autora trata da necessidade dos conhecimentos de Geotecnia Ambiental para algumas atividades referentes ao projeto dessas obras de engenharia. Dentre essas atividades está o estudo da geomecânica dos resíduos, que abrange sua compactação, a percolação de fluidos no maciço sanitário, a estabilidade geotécnica global e local do maciço e a compressibilidade deles (Boscov, 2008).

De acordo com Colomer-Mendoza *et al* (2013), os acidentes geotécnicos ocorridos em aterros sanitários são na maioria dos casos decorrentes da interação de diversas causas, dentre elas: acúmulo de lixiviado; altura e inclinação excessivas dos taludes; acúmulo de biogás; má compactação dos resíduos; falha no terreno subjacente e outras.

A falha do aterro sanitário, segundo Jayaweera (2019), pode ser definida como o movimento descontrolado da massa de resíduos ao longo de um talude e pode ocorrer tanto dentro do maciço sanitário, quanto na interface entre o maciço e as camadas de impermeabilização ou fundação.

No Brasil, dois deslizamentos recentes chamam atenção: em 2022, do aterro sanitário de Fazenda Rio Grande-PR, Fotografia 1, localizado na região metropolitana de Curitiba, deixando um trabalhador morto, e na cidade de Padre Bernardo-GO, onde a pilha de um lixão que operava irregularmente alcançou o

Córrego Santa Bárbara, além uma extensa área de preservação permanente, conforme mostrado na Fotografia 2.

Fotografia 1 - Deslizamento no aterro sanitário de Fazenda Rio Grande-PR.



Fonte: Defesa Civil de Fazenda Rio Grande Disponível em: <<https://www.fazendariogrande.pr.gov.br/noticias/gabinete-do-prefeito/nota-oficial-aterro-sanitario>> Acesso em 14 de ago de 2025

Fotografia 2 - Deslizamento em lixão de Padre Bernardo-GO.



Fonte: SEMAD GO. Disponível em <<https://goias.gov.br/meioambiente/lixao-de-padre-bernardo-empresa-assina-tac-e-se-compromete-com-prazos/>> Acesso em 14 de ago de 2025

Além desses, outros acidentes brasileiros conhecidos historicamente são os no Lixão do Morro das Pedras em Belo Horizonte, MG, ocorridos em novembro de 1971 e novembro de 1972; o do Aterro Sanitário Bandeirantes de 1991 e o deslizamento do Aterro Sanitário Sítio São João de 2007, ambos em São Paulo, SP, e a explosão seguida de desmoronamento de Itaquaquetuba, SP, em abril de 2011.

Para se avaliar a estabilidade dos taludes de RSU é primordial uma estimativa confiável da resistência ao cisalhamento *in situ* dos resíduos. Contudo, a seleção dos parâmetros de resistência apropriados depende da composição, tamanho, grau de degradação e teor de umidade do material.

Somente a partir de uma boa estimativa de tais parâmetros é possível fornecer ao operador os ângulos críticos, altura de talude e nível de lixiviado para operar o local de forma segura (Colomer-Mendoza *et al*, 2013).

Deste modo, objetivando-se atingir soluções de melhor qualidade e segurança no projeto e gestão de aterros sanitários, é imprescindível conhecer sobre as propriedades físicas e mecânicas dos RSU.

## **2.2 . Propriedades Físicas dos RSU**

Analogamente aos solos, o maciço de resíduo é considerado um sistema trifásico composto das fases sólida, líquida e gasosa. Entretanto, para os RSU há ainda a variação dos percentuais destas fases ao longo do tempo, bem como da natureza das suas interações, principalmente em consequência dos processos de biodegradação da fração orgânica (Cardim, 2008).

A natureza, composição e comportamento dos diferentes materiais que compõem os resíduos sólidos são muito variados e, conseqüentemente, as suas propriedades químicas e físicas muito distintas. A seguir, serão apresentadas as propriedades físicas dos resíduos sólidos e a influência que a variação nas frações dos constituintes implica em cada uma delas.

### **2.2.1 . Composição gravimétrica**

A composição dos RSU pode ser bastante heterogênea, contendo desde materiais inertes estáveis, materiais altamente deformáveis e até materiais biodegradáveis, além de ir de pequenos grãos até objetos de dimensões significativas.

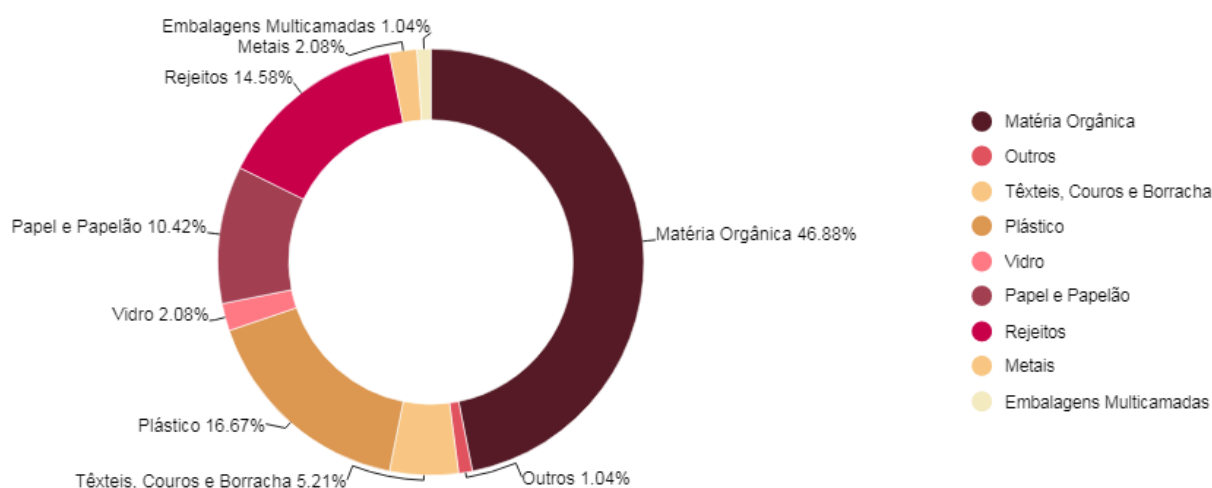
Além disso, devido a variações do estilo de vida e regulamentações sobre o consumo, os materiais encontrados nas disposições de RSU variam também nas escalas geográfica e temporal (Singh e Uchimura, 2023).

A composição gravimétrica, ou gravimetria dos resíduos, é definida como o percentual em massa de cada componente em relação ao peso total da amostra. Como cada categoria de componente possui comportamento diverso, este índice é uma das características de maior influência nas propriedades geomecânicas dos RSU (Boskov, 2008).

Drudi et al (2019) relatam que na determinação da composição gravimétrica, o número de frações em que os resíduos são agrupados depende do grau de profundidade e da finalidade da análise que se deseja proceder. Os mesmos autores enumeram como principais divisões adotadas para análises mais gerais: plásticos, papéis e papelões, orgânicos (restos de comida e poda), material sanitário, fraldas, borracha, isopor, madeira, ferro, alumínio, vidro e outros.

A composição gravimétrica brasileira estimada pela ABRELPE (2020) tem como componente principal a fração orgânica, representando 46,88% do total dos RSU, como pode ser observado no Gráfico 1, que destaca a porcentagem média das frações principais.

Gráfico 1 - Composição gravimétrica brasileira.



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2020)

Estes valores estão de acordo com o presumível na literatura, que aponta que os países em desenvolvimento possuem maiores porcentagens de materiais putrescíveis nos resíduos em relação aos outros materiais (Boskov, 2008).

Mesmo existindo diferentes frações na gravimetria total dos RSU, o comportamento mecânico delas pode ser agrupado em classes. De acordo com Carvalho (1999), vidros, metais, cerâmicas, solos, cinzas e resíduos de construção civil podem ser considerados materiais inertes estáveis e apresentam comportamento semelhante aos solos granulares.

Enquanto isso, os plásticos, papéis, têxteis e borracha comportam-se de modo diferente, desenvolvendo altas deformações e podendo também absorver ou incorporar fluidos dentro de sua estrutura. Por fim, há ainda a classe dos resíduos orgânicos biodegradáveis, que sofrem relevantes transformações físico-químicas já em curto prazo, além da produção de líquidos e gases que passarão a integrar o maciço sanitário (Carvalho, 1999).

Boskov (2008) relembra que por serem dados associados ao comportamento da população, a gravimetria varia ao longo do tempo conforme ocorrem mudanças na sociedade. A autora exemplifica o fenômeno comparando dados da cidade de São Paulo dos anos de 1927 e 2003, onde neste período os materiais putrescíveis caíram de 82,5% para 58%, mesmo período onde ocorreu a popularização de eletrodomésticos como a geladeira.

Há destaque também para os plásticos, que eram praticamente inexistentes até a década de 1960 e representavam cerca de 16% da massa total de resíduos da cidade em 2003 (IPT, 2000 *apud* Boskov, 2008).

Assim sendo, nota-se que o comportamento do maciço de resíduo é muito sensível à variação da gravimetria, justamente por cada fração possuir um tipo de comportamento próprio. Além disso, a mesma não é um índice estático e comum a todos os RSU, variando no tempo e espaço.

### **2.2.2 . Teor de umidade**

O teor de umidade é um parâmetro adimensional, comumente expresso em termos gravimétricos e normalmente apresentado em porcentagem. Pode representar a relação entre a massa de líquido e a massa total, ou seja, por base úmida, ou a massa de líquido relação à massa seca, isto é, umidade com base seca (Alcântara, 2007).

Boscov (2008) destaca a importância do teor de umidade em um maciço sanitário para a velocidade da degradação dos materiais putrescíveis e, por conseguinte, no desenvolvimento das poropressões e recalques.

Muito embora a umidade seja importante para a decomposição dos RSU, quando em excesso ela pode interferir na coleta de gás, reduzir a resistência ao cisalhamento dos resíduos e, muito possivelmente, aumentar os custos de gerenciamento de lixiviados (Krause *et al*, 2023).

A umidade no maciço sanitário é função de vários fatores como a composição gravimétrica inicial, condições climáticas locais, procedimentos operacionais adotados no aterro, eficiência dos sistemas de drenagem interna e superficial, além da recirculação do chorume ou, em alguns casos, adição de águas residuárias de outros empreendimentos.

Em relação à composição gravimétrica inicial, o teor de umidade é diretamente proporcional ao teor de materiais orgânicos, ou seja, quanto maior a porcentagem de materiais putrescíveis, maior o teor de umidade inicial e também maior a umidade ao longo do tempo. Isto ocorre pois essa é a fração que mais possui água na sua constituição, além de que parte da sua fase sólida é convertida em líquido nos processos de biodegradação (Boscov, 2008).

Paralelamente, no tocante às condições climáticas, Carvalho (1999) constatou em seu estudo que a quantidade de líquidos no aterro também depende das taxas de precipitação e evapotranspiração do local, observando ciclos de repetições anuais. Krause *et al* (2023) mencionam ainda que a evapotranspiração é um dos poucos mecanismos, excetuando-se a remoção mecânica de líquidos, que permite a saída de umidade do aterro.

Krause *et al* (2023) concluíram, ao observarem 36 aterros sanitários de Ohio nos Estados Unidos, que o fator de maior impacto no aumento do teor de umidade ao longo da operação do aterro é o teor de água nos resíduos recebidos, seguido pela infiltração da precipitação e, por fim, da recirculação do chorume.

Os autores observaram que mesmo nos aterros onde quase a totalidade do chorume era recirculada, isso não possuía influência significativa na geração de mais chorume, já que a quantidade de resíduos depositados diariamente e de água que eles continham, era muito maior quando comparada à quantidade de líquido recirculada (Krause *et al*, 2023).

Não existem conclusões na literatura acerca da variação da umidade em relação à profundidade do aterro, Carvalho (1999) cita os estudos de Gabr e Valero (1995), Coumoulos et al (1995) e Jucá *et al* (1997), cada qual apontando uma diferente tendência *in situ*, ora havendo aumento e ora diminuição do teor de umidade ao longo da profundidade.

Cardim (2008) completa, destacando que independente das tendências de variação em relação à profundidade, deve-se ter em mente que em pontos distintos de um mesmo aterro podem ocorrer bolsões de umidade, devido à presença de materiais que absorvem líquidos em sua estrutura tais como plástico, papel, papelão, couro, madeira e outros.

Para os resíduos sólidos urbanos, não há ensaio normatizado para obtenção do teor de umidade e tampouco se pode empregar a secagem de amostras em estufas a uma temperatura entre 105°C e 110°C, como é feito para solos. Porque, ao atingir essa temperatura, poderia haver volatilização de algumas substâncias presentes na massa de resíduos, o que causaria decréscimo da massa seca (Boscov, 2008).

Sendo assim, de acordo com Cardim (2008), para a determinação da umidade em laboratório é comum a secagem em estufa a uma temperatura de no máximo 70°C.

### **2.2.3 . Peso específico**

O peso específico é a razão entre o peso de uma amostra e seu volume aparente. É um parâmetro muito importante para o projeto e operação do aterro sanitário, estando presente em muitas análises geotécnicas, como estabilidade de taludes, estudo de perfuração das geomembranas, do esmagamento de tubos dos sistemas de drenagem de líquidos e gases e para avaliação da capacidade geral do aterro sanitário (Zekkos *et al*, 2006).

De acordo com Raviteja e Basha (2021), para os RSU frescos, o peso específico é principalmente influenciado pela composição dos resíduos, cobertura diária e esforço de compactação. Além desses, Zekkos *et al* (2006) citam ainda o gerenciamento de líquidos durante o depósito do resíduo e o estresse de confinamento efetivo atuando naquele momento no maciço sanitário.

No que se refere à composição gravimétrica, o peso específico é menor quanto maior a proporção de materiais leves (plástico, papel e papelão, por exemplo) e menor a quantidade de matéria orgânica.

Sigh e Uchimura (2023) destacam o impacto significativo que os materiais individuais têm no peso específico do RSU, por isso recomendam que sejam feitas avaliações típicas do local para uma determinação mais precisa do índice, já que ele é afetado diretamente pela composição dos RSU, que possui uma variação em escala geográfica.

A respeito da cobertura diária de solo, cabe destacar a diferença entre peso específico dos resíduos, peso específico do solo de cobertura e peso específico da combinação de resíduos e solo, sendo este último o parâmetro de relevância para as análises de engenharia, segundo Zekkos *et al* (2005).

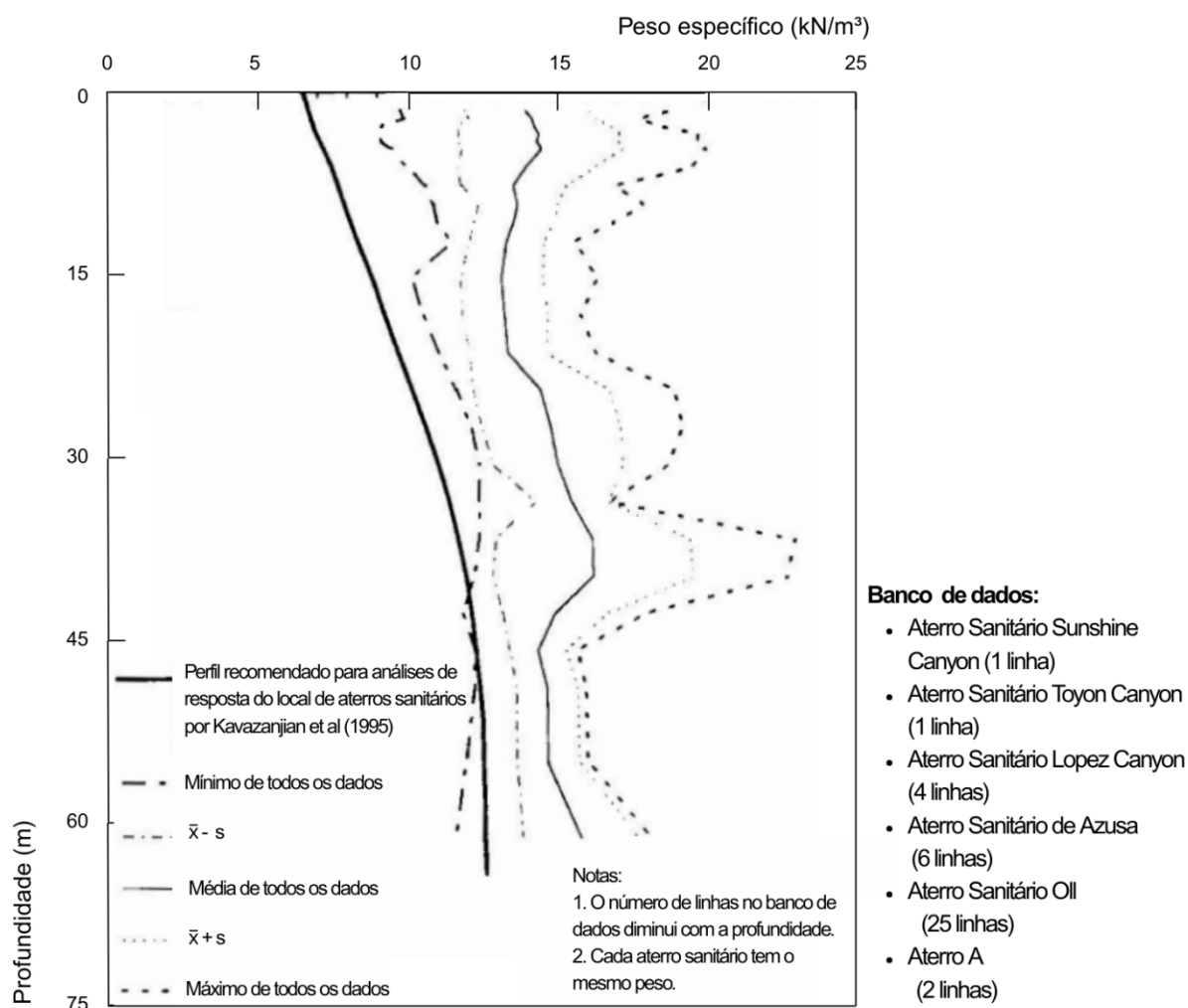
Percebe-se que o peso específico dos resíduos sólidos urbanos, não contabilizando a cobertura diária de solo, é relativamente mais baixo do que o peso específico da mistura RSU mais cobertura diária.

Efetivamente, isso fez com que o perfil de peso específico proposto por Kavazanjian (1995) tivesse que ser reajustado pelo próprio autor em Kavazanjian (1999), Gráfico 2, pois se havia presumido que os valores utilizados se refeririam à mistura de resíduos e cobertura diária de solo. Mas, na realidade, os valores relatados ao autor pelos operadores dos aterros estudados referiam-se apenas ao peso específico do resíduo, conseqüentemente, sendo mais baixos que os valores encontrados em estudos subsequentes.

Acerca das práticas de compactação adotadas, há uma grande sensibilidade do peso específico a elas, com o peso específico para RSU mal compactado sendo muito menor do que quando compactado adequadamente (Raviteja e Basha, 2021).

Além disso, foi observado em campo por Hanson *et al* (2010) que o umedecimento dos resíduos durante a compactação conduzia a pesos específicos secos e totais acima da média, principalmente no caso de resíduos mais secos.

Gráfico 2 - Perfil de peso específico dos RSU



Fonte: Adaptado de Kavazanjian (1999)

Para uma maior segurança da análise do comportamento geotécnico de qualquer aterro é imprescindível conhecer o seu estado de tensões, no qual o peso próprio dos materiais que o constituem tem papel muito relevante. Porém, deve ser ressaltada a dificuldade da obtenção do peso específico *in situ* dos RSU, principalmente através da escavação de poços ou trincheiras.

Entre as limitações desta técnica estão: limitação da profundidade da escavação; alívio de tensões que provoca movimentos laterais e de fundo em direção à abertura, diminuindo o volume da cava; dificuldade de preparação da cava devido à heterogeneidade dos resíduos, principalmente no momento da impermeabilização com manta para medição do volume, já que é difícil a adaptação da mesma à real forma da cava (Suzuki, 2012).

Além disso, há uma dispersão muito grande dos valores de peso específico encontrados na literatura. Zekkos *et al* (2005) compilaram uma série de valores medidos em 37 diferentes aterros sanitários, com o peso específico desses estudos variando entre 3 e 20 kN/m<sup>3</sup>, porém com muitos destes estudos não relatando o método utilizado para mensurar o parâmetro encontrado.

Por fim, no que se refere à influência do peso específico na resistência ao cisalhamento, vários trabalhos apontam que é de se esperar um aumento proporcional de resistência de acordo com o aumento do peso específico dos RSU (Cardim, 2008).

### **2.3 . Propriedades Mecânicas dos RSU**

A necessidade de um melhor aproveitamento dos espaços destinados a aterros sanitários, como já discutido anteriormente, tem conduzido a projetos mais ousados em relação à altura e inclinação dos taludes nos maciços sanitários (Cardim, 2008).

Segundo Boscov (2008) o paradigma dos projetos de aterros sanitários é considerar os resíduos como uma nova unidade geotécnica e aplicar a eles os conceitos da Mecânica dos Solos, fazendo ressalvas referentes às peculiaridades do material quando necessário.

Entretanto, ainda existem lacunas na aplicação dos modelos clássicos da Geotecnia aos RSU, existindo atualmente duas grandes frentes de pesquisa no tema: a busca por modelos de comportamento mais adequados às especificidades do material e a procura pela melhoria das estimativas e determinação dos parâmetros geotécnicos dos RSU (Boscov, 2008).

Singh e Uchimura (2023) completam destacando que, devido à heterogeneidade e deterioração dependente do tempo, é extremamente desafiador avaliar inteiramente as características geotécnicas dos resíduos.

Vários autores enumeram como principais propriedades mecânicas a serem consideradas na estabilidade dos taludes de RSU a compressibilidade e a resistência ao cisalhamento. Dito isto, tais propriedades serão detalhadas a seguir.

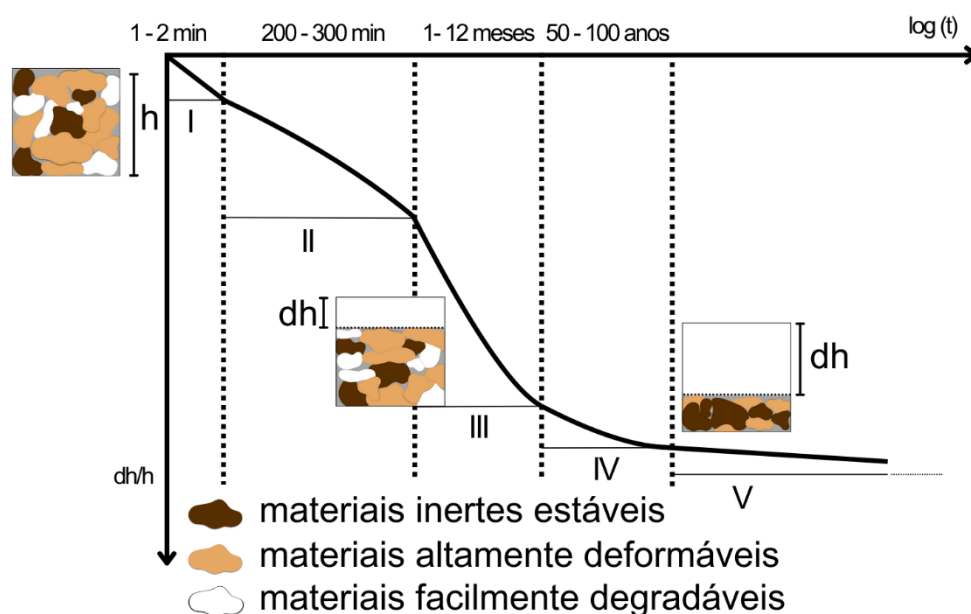
### 2.3.1 . Compressibilidade

Compreender a compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos é de grande importância para o projeto de desempenho dos elementos que fazem parte da estrutura de um aterro: os sistemas de coleta de gases e fluidos, a drenagem superficial, os poços de inspeção, o sistema de cobertura, bem como para estimar a vida útil do empreendimento e sua desativação (Cardim, 2008).

Boscov (2008) aponta que os recalques de maciços sanitários são mais elevados quando comparados aos solos, portanto merecem particular atenção no projeto. Ao mesmo tempo, há o paradoxo de que apesar de problemática, a alta compressibilidade dos aterros sanitários permite prolongar a vida útil do mesmo, ao possibilitar deposições adicionais de resíduos (Carvalho, 1999).

Grisolia e Napoleoni (1996) *apud* Carvalho (1999) propuseram uma curva teórica, Gráfico 3, para explicar o comportamento dos recalques dos resíduos sólidos urbanos. Esta curva é dividida em cinco fases distintas e explica o comportamento do maciço sanitário de acordo com os componentes dos resíduos que o compõe.

Gráfico 3 - Curva Teórica de compressibilidade proposta por Grisolia e Napoleoni (1996).



Fonte: Adaptado de Carvalho (1999)

Os autores apresentam uma classificação que divide a fase sólida dos resíduos em três classes distintas de materiais: materiais inertes estáveis,

materiais altamente deformáveis e materiais facilmente degradáveis. Segundo eles, a evolução dos recalques no tempo e duração de cada fase estão intimamente ligados à composição gravimétrica dos resíduos.

A Fase I, entre e 1 e 2 minutos, caracteriza-se pelos poucos contatos entre os materiais inertes estáveis e uma primeira acomodação dos RSU nos momentos após o lançamento. Enquanto isso, na Fase II, que dura cerca de 200 a 300 minutos, é observada uma acentuada redução de volume dos materiais altamente deformáveis devido à aplicação de sobrecarga e ao peso próprio.

Esta fase é sucedida pela Fase III, de 1 a 12 meses, onde mesmo sob carga constante há deformação dos materiais devido a fluência mecânica e onde se observa também o início das transformações significativas da matéria orgânica, que acontece geralmente após um mês do lançamento.

O início da Fase IV, que vai de 50 a 100 anos, é marcado pelo começo dos contatos diretos entre os elementos inertes estáveis, sendo caracterizada por uma velocidade menor de recalque. Finalmente, na Fase V, a partir dos 100 anos, tem-se as deformações residuais, muito mais lentas e de menor proporção que as demais deformações citadas.

Outros autores que dissertam sobre os mecanismos que regem os recalques em aterros sanitários são Manassero *et al* (1996) *apud* Carvalho (1999), que, por sua vez, dividem o processo em seis fases.

A primeira delas é constituída pela compressão mecânica devido ao peso próprio dos resíduos e à sobrecarga da camada de cobertura diária, além da reorientação das partículas, esmagamento, distorção mecânica e flexão dos elementos individuais que compõem o maciço sanitário.

Na segunda fase há erosão e ravinamento internos, com migração de partículas menores para vazios maiores, o que ocasiona diminuição de volume total do maciço. Após isso, na terceira fase, há um processo de consolidação envolvendo o esqueleto sólido e as partículas individuais, observando desta vez um comportamento viscoso.

A quarta fase é marcada pelos recalques causados pela biodegradação do material orgânico, seguida pela quinta fase, onde há o colapso dos componentes devido às alterações físico-químicas de corrosão, oxidação e

degradação de componentes inorgânicos. Por fim, na sexta fase, o recalque é causado pela dissipação da poropressão de líquidos e gases.

Diante do exposto, percebe-se que o comportamento dos recalques nos aterros sanitários é influenciado por diversos fatores, que podem ser internos ou externos a ele. A iniciar pela composição dos resíduos, principalmente pela presença de materiais biodegradáveis, e pela resistência individual de seus elementos.

Há também a influência das condições climáticas de pluviosidade e temperatura, da densidade inicial do maciço sanitário, nível do lixiviado, entre outros. Além disso, fatores ligados à operação do aterro como eficiência dos sistemas de coleta de gases e líquidos, altura da camada de resíduos, altura da camada de cobertura diária e grau de compactação também interferem sobre o comportamento dos recalques (Bosco, 2008).

### **2.3.2 . Resistência ao cisalhamento**

Estudos anteriores mostram que a maioria de casos de falhas em aterros são devido a falhas nos taludes, o que torna essencial avaliar a resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos (Singh e Uchimura, 2023).

Para a análise da estabilidade de taludes de aterros sanitários, a resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos é tida como uma condição de entrada crítica.

Em vista do conhecimento atual sobre o comportamento dos resíduos sólidos, é conveniente aplicar os conceitos teóricos da Mecânica dos Solos Clássica para interpretação dos dados de ensaios de resistência com RSU.

Isto acontece, pois não há um modelo teórico para envoltória da ruptura dos resíduos tão consagrado como o de Mohr-Coulomb para solos. Gourc e Zekkos (2018) destacam, porém, que se deve ter bastante cautela nessa adoção, uma vez que o comportamento mecânico dos RSU é muito mais complexo que o dos solos.

Segundo os mesmos autores, o maciço de resíduos tem peculiaridades como apresentar um comportamento evolutivo significativo, isto é, um comportamento dependente do tempo, e ser uma mistura cujos constituintes possuem comportamentos muito distintos entre si.

Bray et al (2009) citam como outros obstáculos importantes à avaliação da resistência ao cisalhamento dos RSU a sua heterogeneidade e a dificuldade em se recuperar e testar amostras representativas de resíduos, devido entre outros fatores, ao grande tamanho de alguns de seus constituintes.

Entretanto, nota-se que, mesmo em diferentes termos de composição e estado de alteração, os resíduos sólidos possuem um desempenho característico a respeito de sua curva de tensão-deformação, que não apresenta pico de ruptura, mesmo para grandes deformações (Cardim, 2008).

Frente a este fato, Boscov (2008) orienta que a coesão e ângulo de atrito dos resíduos sejam especificados para um nível aceitável de deformação do aterro, geralmente adotado entre 10% e 15%.

Bray et al (2009) reconhecem a importância da idade dos resíduos na resistência ao cisalhamento, principalmente por estar relacionada ao grau de deterioração do mesmo. Porém, segundo os autores, há fatores para além da idade que também influenciam no grau de degradação, tais como: composição dos resíduos, clima, teor de umidade e os procedimentos de construção e operação do aterro.

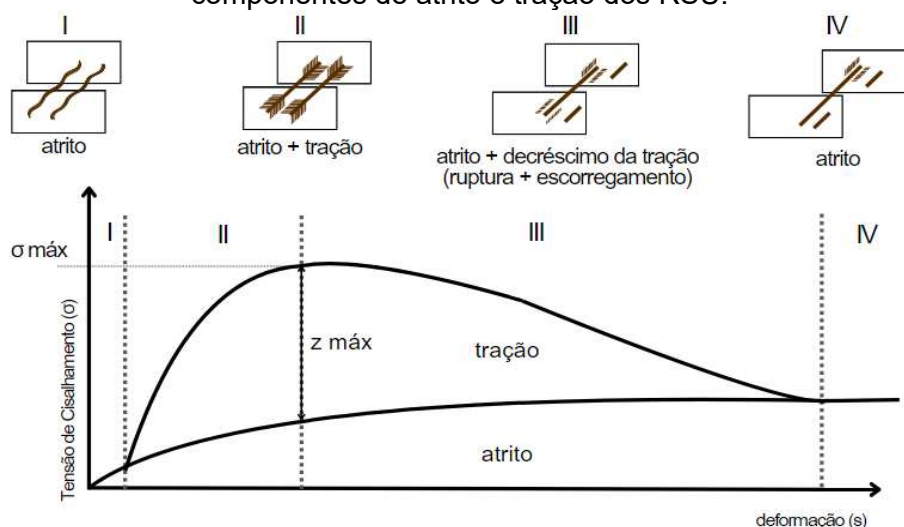
Os efeitos da degradação dos resíduos na resistência ao cisalhamento dos RSU ainda não foram abordados de forma significativa na literatura, o que é agravado pela dificuldade em quantificar o nível de degradação dos resíduos dos trabalhos existentes.

Turczynski (1988) *apud* Bray et al (2009) propõe que a degradação diminui a resistência ao cisalhamento dos resíduos, encontrando uma redução do ângulo de atrito dos RSU de cerca de 39° para resíduos frescos, para 35°, 32° e finalmente 26°, durante 3 anos, 5 anos e 15 anos, respectivamente, acompanhada de uma redução do intercepto de coesão ao longo do tempo.

Kölsch (1995) apresenta a explicação sobre o comportamento da curva tensão *versus* deformação através de um modelo de composição matricial, com a estrutura física dos RSU sendo constituída por duas matrizes: a matriz básica, responsável pela resistência friccional e composta por partículas de até 120 mm e a matriz de reforço, formada por materiais como plásticos, couro, papéis e tecidos e caracterizada pela resistência à tração devido à ação desses componentes fibrosos.

Deste modo, no Gráfico 4 Kölsch (1995) divide a curva tensão x deformação em quatro fases, explicando que na Fase I há apenas mobilização das forças de atrito, visto que as deformações ainda são pequenas e a resistência à tração das fibras ainda não foi ativada.

Gráfico 4 - Representação da curva tensão-deformação com interação entre as componentes de atrito e tração dos RSU.



Fonte: Adaptado de Kölsch (1995)

À medida que as deformações se tornam maiores, inicia-se a Fase II, marcada pelo aumento da contribuição da parcela de tensão de tração das fibras na resistência. Essa fase segue até que seja atingido o valor de tensão máxima ( $z$ ), que corresponde à resistência à tração individual das fibras e/ou ruptura do ancoramento delas no maciço.

A partir disso, na Fase III, há uma gradativa redução de contribuição da componente de tração, até atingir a Fase IV, onde a resistência ao cisalhamento volta a depender somente das componentes de atrito.

Posteriormente, no trabalho de Bray et al (2009), também se observou através de testes de cisalhamento direto que a parte ascendente da curva tensão x deformação é atribuível à contribuição progressiva de materiais fibrosos na resistência ao cisalhamento.

Além disso, ao variar em seu trabalho a orientação das fibras foi possível verificar que a resistência ao cisalhamento aumentava significativamente quando o plano de corte era imposto perpendicularmente à orientação das fibras.

Isto indica que os RSU possuem uma clara natureza anisotrópica, com uma orientação preferencial e um papel do reforço da matriz fibrosa importante na curvatura ascendente no diagrama de tensão x deformação (Bray et al, 2009).

Athanasopoulos et al (2008) relatam o efeito significativo da composição dos resíduos sólidos na resistência ao cisalhamento e na resposta de tensão x deformação, indicando que o efeito dos materiais fibrosos causa tendências nos RSU semelhantes às aquelas observadas em solos reforçados.

Ainda, a atribuição das fibras na resistência ao cisalhamento pode sugerir que o decréscimo de resistência de acordo com a idade dos RSU provavelmente seja devido ao fato da degradação modificar a composição da massa de resíduos, deixando os elementos com dimensões menores e mais homogêneas (Bray et al, 2009).

Diante disso, é importante ter cautela ao avaliar a resistência a longo prazo dos RSU para aterros que deverão sofrer degradação significativa de resíduos. Neste caso, segundo Bray et al (2009), é mais recomendável a utilização da envoltória de resistência ao cisalhamento direto para amostras com um plano de cisalhamento orientado na mesma direção do longo eixo da partícula, ou seja, amostras onde o reforço fibroso não afete a resistência.

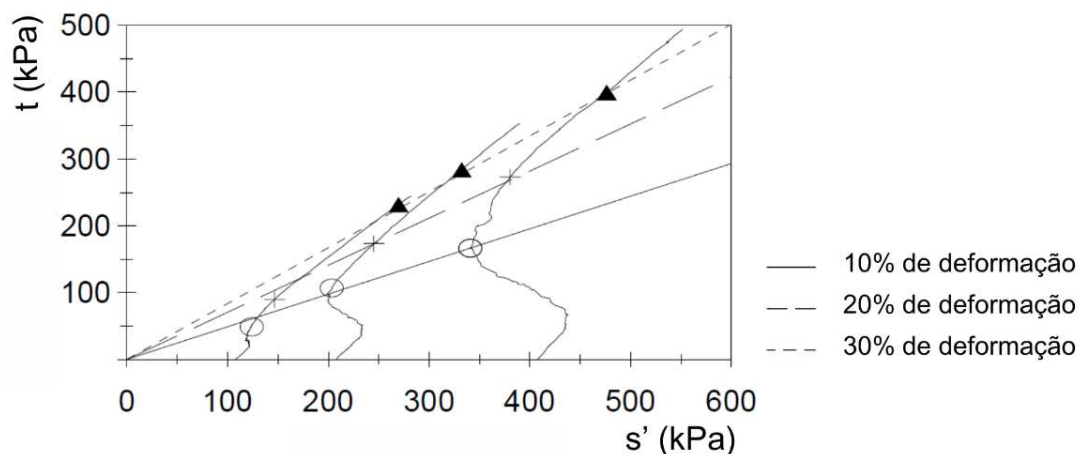
Por outro lado, Singh e Uchimura (2023) demonstram que a resistência ao cisalhamento dos RSU depende principalmente da componente de atrito em níveis de pressão e confinamento maiores, enquanto que a parcela da coesão se mostra mais considerável em níveis de pressão e confinamento mais baixos.

Bray et al (2009) tratam das diferentes repostas de tensão x deformação observadas em diferentes tipos de testes. Segundo os autores, para o teste de cisalhamento direto, o diagrama é tipicamente descrito por formato convexo, isto é, aproximadamente hiperbólico, podendo se aproximar de um valor assintótico em grande deformação e às vezes incluindo uma redução pós-pico na resistência.

Enquanto isso, nos testes triaxiais, a resposta tensão-deformação do RSU frequentemente se inicia com um traçado convexo, depois quase linear e finalmente torna-se côncavo. Ou seja, exhibe uma curvatura ascendente sem qualquer sinal de atingir um valor assintótico, muito menos um pico de tensão de cisalhamento bem definido (Bray et al, 2009).

Sobre os testes triaxiais não drenados, Vilar e Carvalho (2004) encontraram, em seus ensaios de grandes dimensões com resíduos reais, caminhos de tensão efetivos com o formato de “S”, Gráfico 5, refletindo as poropressões positivas crescentes em baixas deformações e que tendem a se estabilizar conforme aumenta a tensão desviadora e a deformação, o que causa um aumento simultâneo em  $t \left( \frac{\sigma'_{1}-\sigma'_{3}}{2} \right)$  e  $s' \left( \frac{\sigma'_{1}+\sigma'_{3}}{2} \right)$ .

Gráfico 5 - Caminhos de tensão de Vilar e Carvalho (2004).



Fonte: Vilar e Carvalho (2004)

Além disso, ao comparar os resultados obtidos em testes drenados e não-drenados, Vilar e Carvalho (2004) perceberam que nestes últimos as envoltórias de resistência efetivas passavam pela origem do sistema de coordenadas e os ângulos de atrito efetivos eram maiores do que aqueles medidos nos ensaios com drenagem.

Carvalho (1999) enfatiza que os ensaios de laboratório possuem limitações de qualidade no que se refere à distribuição do tamanho dos elementos e à composição representativa do total, necessitando muitas vezes de equipamentos de grandes dimensões para tentar contornar isso.

É importante destacar também que, via de regra, as amostras de resíduos sólidos serão sempre amostras reconstituídas. Muito embora, Gourc e Zekkos (2018) defendam que isso não chega a ser considerado um problema, visto que os RSU não são formados por processos geológicos, mas sim por procedimentos de operação em campo que podem ser facilmente imitados em laboratório.

Portanto, a fim de solucionar os diversos impasses das experimentações em resíduos sólidos, algumas pesquisas têm se baseado no conceito de resíduos sólidos municipais sintéticos (RSMS) conforme será discutido a seguir.

#### **2.4 . Determinação das propriedades geotécnicas dos resíduos**

A determinação das propriedades geotécnicas dos RSU é considerada um desafio devido, entre outros fatores, à heterogeneidade do material, à grande variação na distribuição do tamanho das partículas e à degradação dependente do tempo (Reddy et al 2009).

Dixon et al (2008) afirmam que avaliar o comportamento e as propriedades de engenharia dos RSU é bastante complicado, principalmente graças à variedade dos materiais presentes no maciço sanitário. Ou seja, há uma grande variação entre as amostras, o que torna difícil quantificar a contribuição de cada elemento para o comportamento do global dos RSU.

Os mesmos autores concordam ainda que o ideal seria a realização de ensaios em materiais não perturbados, porém isto é extremamente difícil de ser obtido, fazendo com que seja necessário buscar formas de contornar esses dilemas.

Como resultado disso, nos últimos anos tem aumentado a utilização de resíduos sólidos municipais sintéticos (RSMS) no estudo do comportamento mecânico dos RSU. Os resíduos sintéticos são materiais produzidos em laboratório, na composição desejada, a partir da mistura de diferentes elementos e com a finalidade de simular RSU para a realização de ensaios geotécnicos (Singh e Uchimura, 2023).

A opção de utilizar RSMS no lugar de resíduos sólidos urbanos reais possui, segundo Singh e Uchimura (2023), diversas vantagens, citando dentre elas o melhor controle da composição da amostra, a redução da incerteza nos componentes com base no tamanho, forma e propriedades do material; bem como a utilização de componentes mais limpos, superando preocupações sanitárias e de segurança no laboratório.

Além disso, o uso de resíduos sintéticos oferece a oportunidade de mensurar a influência no comportamento mecânico de mudanças na composição do material, ou seja, a variabilidade entre as propriedades da amostra pode ser medida e controlada (Dixon et al, 2008).

Logo, através do emprego de RSMS, se pode investigar a atuação de determinados elementos isoladamente no comportamento global do maciço, seja por mudanças na gravimetria ou forma de construção do corpo de prova.

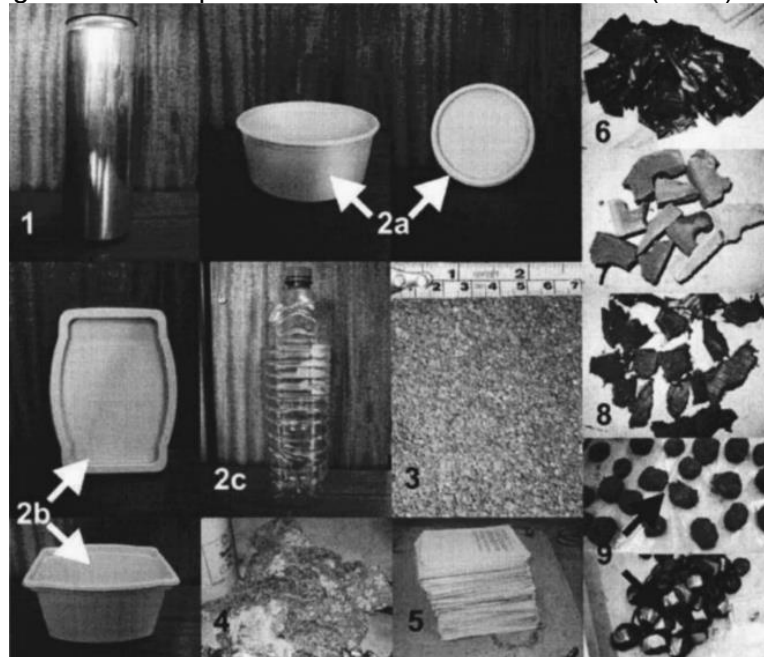
De acordo com Dixon et al (2008) os principais requisitos para a utilização de um resíduo sintético são que os componentes utilizados sejam representativos da gama de materiais encontrados nos depósitos de RSU. Isto inclui o tipo de material, tamanho e estrutura, e que estes possam ser misturados em proporções para reproduzir uma classificação específica de resíduo.

No presente trabalho, foram considerados por “resíduo sólido municipal sintético” aquele material constituído em laboratório que simultaneamente fizesse a simulação de gravimetrias pré-definidas pelos pesquisadores (através da mistura de dois ou mais materiais, excluindo-se o solo) e alterações no tamanho dos constituintes, podendo os ter reduzido tanto por moagem, corte, trituração ou outro método.

Um dos primeiros trabalhos a citar o uso de resíduos sintéticos foi o de Dixon *et al* (2008), que tinham por objetivo estudar a influência no comportamento mecânico de mudanças sistemáticas na composição do material, com a finalidade de validar um sistema de classificação dos RSU. Porém, tanto para o ensaio de compressão unidimensional, quanto para o de resistência ao cisalhamento direto foram utilizados equipamentos adaptados à grande escala.

Para eleger os melhores componentes de resíduos sintéticos que replicassem os RSU, conforme Fotografia 3, Dixon *et al* (2008) realizaram uma triagem dos materiais enviados ao aterro de Narborough, no Reino Unido. Além disso, destaca-se que em sua mistura de RSMS, todos os componentes foram adicionados secos, excetuando-se aqueles que representassem a matéria orgânica.

Como resultado, Dixon *et al* (2008) obtiveram um comportamento de compressão e cisalhamento dos resíduos sintéticos dentro da faixa de valores publicados para resíduos reais. Entretanto, os pesquisadores observaram pesos específicos mais baixos e condições de menor umidade para os resíduos sintéticos. Mesmo assim, concluíram que os RSMS podem ser utilizados para avaliar a relação entre classificação e comportamento mecânico, de compressão e cisalhamento.

Fotografia 3 - Componentes do RSMS de Dixon *et al* (2008)

Legenda: 1 - latas de alumínio; 2 a,c - embalagens plásticas rígidas; 3- areia Leighton-Buzzard; 4 - têxteis; 5 - papel; 6 - plástico flexível; 7 - frações de tijolos; 8 - pedaços de pneus; e 9- pedaços de argila  
 Fonte: Dixon *et al* (2008)

Da mesma época, tem-se a investigação da influência dos elementos fibrosos descrita por Athanasopoulos *et al* (2008) que construíram corpos de prova de cisalhamento direto, ilustrados na Fotografia 4, orientando as fibras presentes a partir de ângulos pré-estabelecidos.

Fotografia 4 - Processo de preparação das amostras de RSMS de Athanasopoulos *et al* (2008)

Fonte: Athanasopoulos *et al* (2008)

Os resultados de Athanasopoulos *et al* (2008) foram consistentes com as faixas de resultados de ensaios com RSU anteriores da literatura. Além disso, a utilização do método permitiu inferir que a resistência ao cisalhamento do RSMS é altamente anisotrópica, com a tensão de cisalhamento mobilizada muito dependente do ângulo de orientação da fibra e do tipo de material fibroso.

A partir do estudo anterior de Dixon *et al* (2008), Reddy *et al* (2009) empreenderam uma série de ensaios visando determinar as propriedades de condutividade hidráulica, compressibilidade e resistência ao cisalhamento de RSMS.

Entretanto, agora Reddy *et al* (2009) tinham como objetivo avaliar sistematicamente a reprodutibilidade dos resultados quando realizados ensaios com RSMS na escala geotécnica. Outra diferença do trabalho de Reddy *et al* (2009) para o de Dixon *et al* (2008) é que desta vez os autores decidiram adicionar água deionizada ao RSMS.

Além disso, Reddy *et al* (2009) tiveram o cuidado de selecionar os tamanhos dos componentes de forma a não influenciar excessivamente os resultados dos ensaios com os equipamentos convencionais de laboratório.

Com base nas análises estatísticas, COV e ANOVA, Reddy *et al* (2009) concluíram que a reprodutibilidade nos ensaios com RSMS havia sido garantida, com variações sendo fruto principalmente devido às variações no peso específico entre as amostras. Inclusive, a compressibilidade e o comportamento de cisalhamento direto do RSMS replicaram bem o comportamento dos RSU da literatura.

Porém, provavelmente devido à presença de 40% de materiais finos escolhidos para representar os materiais inorgânicos, a condutividade hidráulica do RSMS de Reddy *et al* (2009) foi inferior à condutividade hidráulica relatada de campo. Além disso, foi observado também um comportamento coesivo nos ensaios triaxiais consolidados não drenados, em vez de comportamento friccional esperado.

À vista disso, foi proposto por Reddy *et al* (2011) uma redução do material fino, substituindo parte dele por um solo arenoso local, no trabalho que buscaram quantificar sistematicamente as mudanças nas propriedades geotécnicas em diferentes fases de biodegradação.

Embora tenham chegado a conclusões significativas na área de projeto de aterros sanitários, Reddy *et al* (2011) relataram que o RSMS utilizado ainda carecia de componentes fibrosos com propriedades de fricção e interligação.

Seguindo a mesma linha, Hettiarachchi e Thani (2011) também propuseram uma mistura de RSMS que empregava solo arenoso para representar os materiais friccionais não biodegradáveis, mas, desta vez, adicionando esferas de plástico, conforme pode ser visto na Fotografia 5.

Fotografia 5 - Amostra de RSMS de Hettiarachchi e Thani (2011)



Fonte: Hettiarachchi e Thani (2011)

Hettiarachchi e Thani (2011) observaram que os resultados dos ensaios de cisalhamento direto em RSMS eram comparáveis ao relatado na literatura para RSU, com a curva de tensão-deslocamento não exibindo um pico de tensão ou ruptura.

Ainda, ao variarem a composição das amostras, puderam concluir que a adição de materiais que representassem a matéria orgânica aumentava a coesão, mas também que materiais como plásticos e fibras de juta, que podiam ser considerados elementos fibrosos, também eram capazes de contribuir para a coesão dos RSMS.

Por outro prisma, Cho *et al* (2011), propuseram criar um RSMS a partir de uma gama maior de materiais, que incluíam desta vez: resíduos alimentares,

papel de escritório, jornal, garrafas plásticas, papel filme, latas de alumínio, lascas de madeira, roupas descartadas, garrafas de vidro e cinzas.

Estes autores tinham por objetivo estudar o impacto do teor de resíduos alimentares no ângulo de atrito do RSU e, para tanto, realizaram ensaios de cisalhamento direto de pequenas e grandes dimensões em RSMS, obtendo resultados satisfatórios.

Por sua vez, Pulat e Yukselen-Aksoy (2013) prepararam amostras de RSMS que simulavam a gravimetria de três diferentes locais, Europa, Estados Unidos e Turquia, Fotografia 6, e compararam os efeitos da composição, degradação e energia no comportamento de compactação de amostras de RSMS e RSU.

Fotografia 6 - RSMS utilizado por Pulat e Yukselen-Aksoy (2013)



Fonte: Pulat e Yukselen-Aksoy (2013)

Como conclusão, Pulat e Yukselen-Aksoy (2013) indicaram não haver diferença significativa entre as curvas de compactação de resíduos reais e resíduos sólidos municipais sintéticos.

Ojuri e Adegoke (2015) também construíram corpos de prova de RSMS a fim de simular resíduos sólidos urbanos do sudoeste da Nigéria, baseados principalmente no trabalho de Reddy *et al* (2009). Estes autores determinaram teor de umidade, gravidade específica, distribuição de tamanho de partículas,

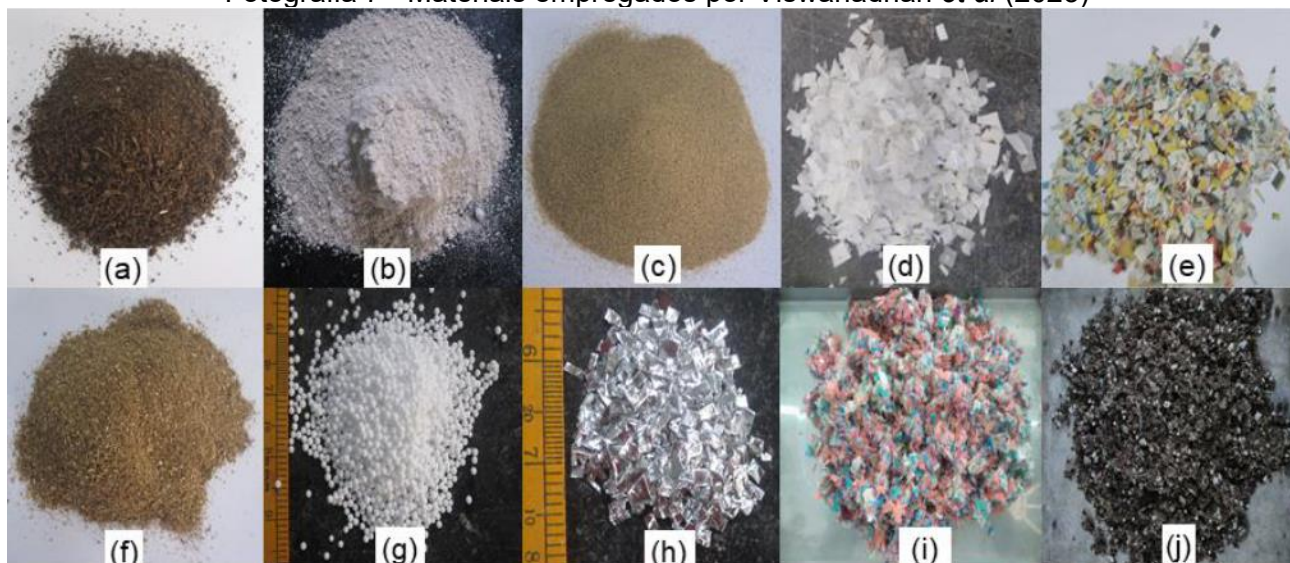
compactação, compressibilidade e resistência ao cisalhamento, com resultados também se situando dentro da faixa de valores esperados para RSU.

Xie *et al* (2022) investigaram a compactação, condutividade hidráulica, resistência à compressão e propriedades de cisalhamento com adição de água e lixiviado ao teor de umidade do campo.

Em seu estudo, concluíram que seus resíduos sintéticos apresentaram propriedades geotécnicas semelhantes às de resíduos sólidos urbanos naturais coletados em aterros, especialmente quando se considerou a variação de composição e exposição ao lixiviado Xie *et al* (2022).

Um interessante passo foi dado por Viswanadham *et al* (2023), que utilizaram do recurso de variar proporções de polpa de coco, areia fina e argila do RSMS para simular diferentes estágios de decomposição de RSU. Além disso, utilizaram ainda outros materiais para representar melhor o comportamento de um maciço sanitário.

Fotografia 7 - Materiais empregados por Viswanadham *et al* (2023)



Fonte: Viswanadham *et al* (2023)

O estudo de Viswanadham *et al* (2023) concluiu que os resíduos sintéticos desenvolvidos conseguiam modelar de forma satisfatória as propriedades geotécnicas dos RSU reais, especialmente quando comparados os diferentes estágios de decomposição.

Por fim, Sigh e Uchimura (2023) se propuseram compreender a contribuição de diferentes materiais empregados na construção de um RSMS, Fotografia 8,

como papel, plástico e matéria orgânica, no comportamento ao cisalhamento dos resíduos sintéticos. Os autores chegaram à conclusão que o peso específico e a resistência ao cisalhamento encontrados eram considerados consistentes com valores já publicados anteriormente para RSU.

Fotografia 8 - Materiais empregados por Sigh e Uchimura (2023)



Fonte: Sigh e Uchimura (2023)

As diferentes propostas de materiais e dimensões de cada um dos autores apresentados foram reunidas na .

Tabela 1 - Diferentes materiais e dimensões empregadas por autor

Referência	Materiais utilizados	Tamanhos aproximados
Dixon <i>et al</i> (2008)	Papel A4, sacos de lixo, pedaços de pneus, garrafas PET, latas de alumínio, têxteis, torrões de argila envoltos em plástico filme, frações de tijolos e solo arenoso local	Reforços fibrosos: 120 mm x 500 mm Materiais granulares: 10 mm a 40 mm Solo: com granulometria inferior a 10 mm
Athanasopoulos <i>et al</i> (2008)	Papel, plástico, madeira e areia local	Reforços fibrosos: de 20 mm x 90 mm a 60 mm x 130 mm Solo: com granulometria inferior a 20 mm
Reddy <i>et al</i> (2009)	Carne moída, aparas de grama, verduras, pão de trigo, papel picado, solo glacial local	Reforços fibrosos: de 7 mm x 10 mm a 3 mm x 25 mm Materiais granulares: menores que 6,3 mm Material moído Solo: 30% das partículas menores que 0,075 mm
Reddy <i>et al</i> (2011)	Carne moída, aparas de grama, verduras, pão de trigo, papel picado, solo glacial local	Reforços fibrosos: de 7 mm x 10 mm a 3 mm x 25 mm Materiais granulares: menores que 6,3 mm Material moído Solo: glacial local (CL) e areia fina (SP)
Hettiarachchi e Thani (2011)	Macarrão cozido, esferas de plástico, fibra de juta, areia local	Reforços fibrosos: 2 mm x 5 mm Materiais granulares: de 3 a 4 mm Solo: granulometria contida entre 2 mm a 4,75 mm
Cho <i>et al</i> (2011)	Resíduos alimentares, papel de escritório, jornal, garrafas plásticas e papel filme, latas de alumínio, lascas de madeira, roupas descartadas, garrafas de vidro e cinzas	Reforços fibrosos: de 10 mm x 10 mm a 7 mm x 45 mm Materiais granulares: 4,75 mm Material moído
Pulat e Yukselen-Aksoy (2013)	Batatas, vidro quebrado, grama, aparas de madeira, lascas de metal, cinzas, papel, papelão, têxteis, solo	Reforços fibrosos: com dimensão máxima de 25,4 mm Materiais granulares: 4,75 mm Solo: com granulometria inferior a 0,425 mm
Ojuri e Adegoke (2015)	Batatas, vidro quebrado, grama, aparas de madeira, lascas de metal, cinzas, papel, papelão, têxteis, solo	Reforços fibrosos: com dimensão máxima de 25,4 mm Materiais granulares: 4,75 mm Solo: com granulometria inferior a 0,425 mm
Xie <i>et al</i> (2022)	Resíduos alimentares, papel, papelão, restos de poda, madeira, têxteis, vidro, plásticos, metal, resíduos de construção	Reforços fibrosos: 2,36 mm x 9,5 mm e 9,5 mm x 38 mm Materiais granulares: 2,36 mm e 9,5 mm Material moído

Viswanadham <i>et al</i> (2023)	Polpa de coco, jornal, folhas de polietileno, papel alumínio, serragem, esferas de EPS, areia fina e argila	Reforços fibrosos: de 2 mm x 2 mm a 3 mm x 3 mm Materiais granulares: 2 mm Material moído Solo: argila (inferior a 0,075 mm) e areia (inferior a 0,425 mm)
Singh e Uchimura (2023)	Resíduos alimentares, restos de poda, turfa, papel A4, papelão, têxtil, sacolas plásticas, garrafas PET, latas de alumínio, chapas de metal, madeira picada, argila e areia	Reforços fibrosos: de 10 mm x 100 mm a 15 mm x 200 mm Materiais granulares: 20 mm Material moído Solo: argila e areia

---

Fonte: Elabora pela autora

Portanto, como não há um padrão normativo ou mesmo metodológico entre os trabalhos publicados, percebe-se que foram aplicadas diferentes formas de constituição dos RSMS. Isso, junto com a variabilidade de composições dos RSU que basearam os trabalhos, resultam na dispersão significativa dos dados publicados.

### 3 . MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo está apresentada a metodologia que foi delineada a fim de se cumprir com os objetivos propostos. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC), localizado na Universidade Federal de Viçosa (UFV), com resíduos sintéticos produzidos especificamente para esta finalidade.

O programa experimental seguiu o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), estabelecendo-se três diferentes tratamentos, que variam entre si na porcentagem de matéria orgânica dentro da composição gravimétrica.

No primeiro tratamento proposto, MO01, a gravimetria inicial a ser tomada foi a gravimetria típica da cidade de Viçosa-MG, determinada por Soares (2021). Destaca-se que esta composição gravimétrica apresenta coerência com os resultados mais recentes da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) para o estado de Minas Gerais, sendo apresentada na Tabela 2 a comparação entre as duas gravimetrias.

Tabela 2 - Composição gravimétrica dos resíduos de Viçosa e de Minas Gerais.

<b>Categoria</b>	<b>Viçosa</b>	<b>Minas Gerais</b>
Matéria orgânica compostável	44,5%	44,8%
Plástico*	15,6%	13,6%
Papel e papelão	8,2%	11,5%
Vidro	2,4%	2,7%
Metais	1,1%	2,4%
Couro, borracha e têxtil	3,2%	4,4%
Madeira	0,3%	0,9%
Outros	1,4%	4,6%
Rejeitos	23,3%	15,1%

\*Em Soares (2021), há a subdivisão do grupo “Plástico” em “Plástico Mole” com fração de 11,2% e “Plástico Duro” com fração de 4,4%

Fonte: Soares (2021) e FEAM (2017)

A utilização de RSMS permite, entre outras vantagens, a manipulação da gravimetria com vistas a investigar a contribuição de cada elemento para o comportamento do global dos RSU.

Sendo assim, a princípio, para o segundo e o terceiro tratamentos propostos, MO02 e MO03, a porcentagem de matéria orgânica compostável (MOC) foi decrescida, diminuindo-se 10% de MOC a cada tratamento.

Foi escolhido o decréscimo da fração orgânica porque, conforme já discutido, ela é a maior fração em porcentagem; é uma fração com possibilidades reais de reaproveitamento ou redução de geração e é uma fração com tendência de queda no cenário nacional.

Portanto, as porcentagens de matéria orgânica ficaram inicialmente como 34,5% e 24,5% da composição gravimétrica, respectivamente em MO02 e MO03.

Após fixado o novo valor de MOC, as demais frações foram recalculadas de modo a manter as mesmas proporções que existiam entre os elementos da fração não-orgânica anteriormente, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Composição gravimétrica dos tratamentos MO01, MO02 e MO03

Categoria	Frações		
	MO01	MO02	MO03
Matéria orgânica compostável	44,5%	34,5%	24,5%
Plástico Mole	11,2%	13,2%	15,2%
Plástico Duro	4,4%	5,2%	6,0%
Papel e papelão	8,2%	9,7%	11,2%
Vidro	2,4%	2,8%	3,3%
Metais	1,1%	1,3%	1,5%
Couro, borracha e têxtil	3,2%	3,8%	4,4%
Madeira	0,3%	0,4%	0,4%
Outros	1,4%	1,7%	1,9%
Rejeitos	23,3%	27,5%	31,7%

Fonte: Elaborada pela autora

Ou seja, a mesma proporção de Plástico Mole em relação ao Vidro é encontrada em MO01, MO02 e MO03 e isto vale para todas as relações das frações entre si, quando desconsiderada a fração da matéria orgânica compostável.

Além disso, como a fração “Outros” é justamente composta por objetos que são difíceis de serem enquadrados nas demais frações, houve dificuldade de encontrar substitutos para representá-la nos resíduos sintéticos.

Por isso, e por se tratar de uma pequena porcentagem em relação ao todo, ela foi desconsiderada e a quantidade referente a ela redistribuída proporcionalmente entre as demais frações conforme disposto na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição gravimétrica final dos tratamentos MO01, MO02 e MO03

Categoria	Frações		
	MO01	MO02	MO03
Matéria orgânica compostável	45,1%	35,1%	25,0%
Plástico Mole	11,4%	13,4%	15,5%
Plástico Duro	4,5%	5,3%	6,1%
Papel e papelão	8,3%	9,8%	11,4%
Vidro	2,4%	2,9%	3,3%
Metais	1,1%	1,3%	1,5%
Couro, borracha e têxtil	3,2%	3,8%	4,4%
Madeira	0,3%	0,4%	0,4%
Rejeitos	23,6%	28,0%	32,3%

Fonte: Elaborada pela autora

### 3.1 . Preparação dos Resíduos Sólidos Municipais Sintéticos (RSMS)

Foi exposto nos tópicos anteriores que o ponto chave do sucesso do uso dos resíduos sintéticos como representação de resíduos sólidos urbanos reais está em uma boa escolha dos materiais representativos dos elementos que constituem os RSU.

Não há ainda consenso na literatura de quais materiais e tamanhos devem ser utilizados para a constituição dos corpos de prova de RSMS, muito menos padrões normativos para a utilização do método.

Diante disso, foram primícias deste trabalho buscar ao máximo representar cada fração por seu material original e variar dentro de cada fração, quando a sua classificação englobasse materiais de comportamentos heterogêneos, uma gama de materiais distintos a fim de melhorar a simulação do comportamento do grupo.

Sendo assim, cada fração ficou representada da seguinte maneira, conforme mostrado na Fotografia 9:

a) Matéria Orgânica Compostável – foi representada em totalidade por carne moída de bovino, fresca e crua, em sua umidade natural.

b) Plástico Mole – foi representado em totalidade por sacos de lixo, por ser o principal representante do grupo nos resíduos reais.

c) Plástico Duro – representado em totalidade pelo plástico tipo PET (polímero politereftalato de etileno), por ser um dos tipos de plástico mais utilizados mundialmente. Variou-se também a gramatura do PET utilizado nas amostras, possuindo materiais que vão dos mais flexíveis aos mais rígidos.

d) Papel e Papelão – a representação desta fração foi dividida em três subgrupos, cada um com 1/3 do peso total da fração. Os materiais escolhidos para representar foram: papel de escritório, papel cartão e papelão. A escolha da variação pretendeu representar melhor os comportamentos diferentes que cada gramatura e tipo de composição do papel podem influir no maciço.

e) Vidro – foi representado em totalidade por vidro temperado, por permitir ser quebrado em cubos que não formassem arestas vivas.

f) Metais – foi representado em totalidade por alumínio, por ser encontrado normalmente nos resíduos reais e por permitir ser preparado no tamanho compatível com o ensaio.

g) Couro, Borracha e Têxtil – a representação desta fração também foi dividida em três subgrupos, cada um com 1/3 do peso total da fração. Os materiais escolhidos para representar foram: tecido de algodão; tecido de poliéster e borracha. A escolha da variação buscou representar os comportamentos distintos dos materiais principalmente na absorção de líquidos e deformação.

h) Madeira – foi representada em totalidade por maravalha, que é um subproduto do desdobramento da madeira, constituído por materiais finos e alongados.

i) Rejeitos – a representação desta fração foi dividida em dois subgrupos, cada um com 1/2 do peso total da fração. Os materiais escolhidos foram papel higiênico e enchimento absorvente de fraldas. A escolha se deu ao fato de estes materiais serem os principais componentes dessa fração observados nos resíduos reais e a divisão por serem materiais de comportamentos muito distintos.

Fotografia 9 - Tamanho e forma das partículas do Resíduo Sólido Municipal Sintético (RSMS) após preparo para ensaios laboratoriais.



Legenda: (a) Carne moída – M.O.C.; (b) PET – plástico duro; (c) sacos de lixo – plástico mole; (d) papel de escritório – papel e papelão; (e) papel cartão – papel e papelão; (f) papelão – papel e papelão; (g) tecido de algodão – borracha e têxtil; (h) tecido de poliéster – papel e papelão; (i) borracha – borracha e têxtil; (j) vidro; (l) maravalha – madeira; (m) alumínio – metais.

Fonte: Elaborada pela autora

Todos os materiais utilizados para a produção dos RSMS estavam secos, com exceção da carne moída que foi adicionada em sua umidade natural e do enchimento absorvente que foi preparado considerando 50% de peso seco e

50% de água, uma vez que este ao ser descartado normalmente contém líquido absorvido.

Para realização de testes utilizando equipamentos geotécnicos tradicionais, foi necessário limitar o tamanho do resíduo, conforme redução e padronização das dimensões mostrados na Fotografia 9.

Desta forma, Plásticos, Papéis, Metais, Têxteis, Madeira e Papel Higiênico foram cortados à mão em tamanhos que variam entre 1 a 3 mm de largura e 5 a 15 mm de comprimento. Os cubos de vidro possuíam em média 5 mm de lado e a carne e enchimento absorvente foram misturados em seus tamanhos originais.

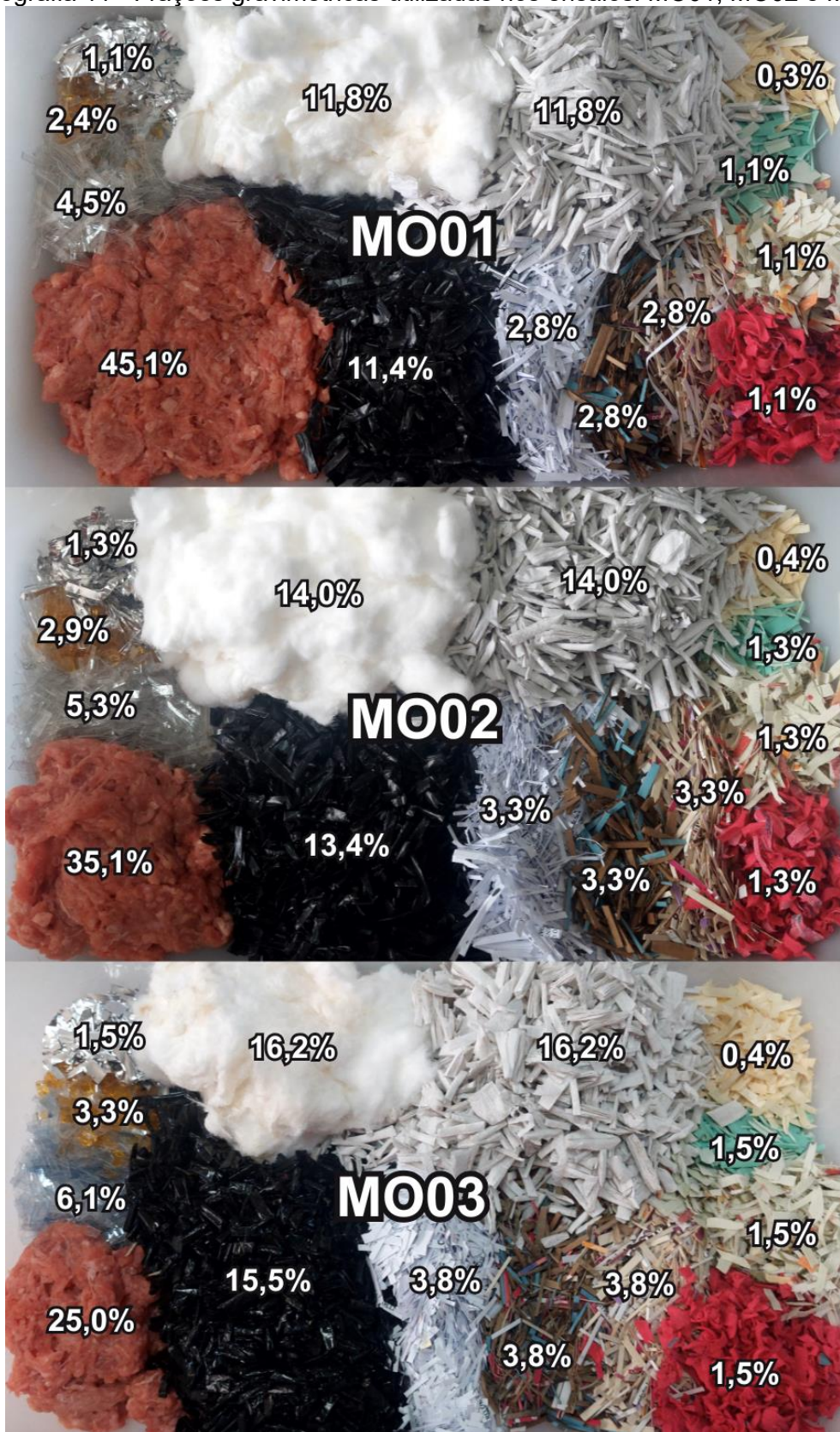
Após a preparação dos materiais foram realizadas as misturas, conforme mostrado nas Fotografias 10 e 11, que representassem as composições gravimétricas pré-definidas, denominadas MO01, MO02 e MO03 de acordo com o já detalhado na Tabela 4.

Fotografia 10 - Mistura final dos materiais - amostras MO01



Fonte: Elaborada pela autora

Fotografia 11 - Frações gravimétricas utilizadas nos ensaios: MO01, MO02 e MO03



Fonte: Elaborada pela autora

### **3.2 . Ensaios Geotécnicos**

As amostras de resíduo sintético foram submetidas a ensaios de laboratório visando investigar a influência da variação da composição gravimétrica no peso específico e nas características de resistência.

Foi acrescentada ainda às misturas de RSMS a quantidade de 10% em peso de um solo argiloso local, classificado como argila de alta compressibilidade (CH) e já caracterizado anteriormente por Queiroz *et al* (2025).

Este acréscimo se justifica, pois, quantidades significativas de solo podem se misturar aos resíduos nos aterros devido a aplicações sucessivas de cobertura diária (Reddy, 2011). E, como já discutido anteriormente, o parâmetro de relevância para as análises de engenharia é o peso específico da combinação de resíduos e solo (Zekkos *et al*, 2005).

#### **3.2.1 Ensaio de compactação**

O ensaio de compactação seguiu as diretrizes da ABNT (2016), com as amostras compactadas à energia normal de Proctor. O molde cilíndrico utilizado media 10 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura e o processo de compactação foi dividido em três camadas, cada qual recebendo 26 golpes de um soquete de 2,5 kg de peso e 30 cm de altura de queda.

Para se mensurar a umidade, foram tomadas a cada ponto da curva de compactação seis cápsulas que foram submetidas à secagem em estufa em uma temperatura controlada de 70°C por 48 horas.

#### **3.2.2. Ensaio de resistência ao cisalhamento consolidado não drenado**

O ensaio de cisalhamento triaxial consolidado não drenado (CIU) foi montado segundo a norma internacional ASTM D4767 (ASTM, 2008).

É relevante informar que mesmo as partículas do RSMS possuindo maior diâmetro que as partículas de solo, segundo Ojuri e Adegoke (2015) esse detalhe pode ser desconsiderado. Pois, segundo os autores, a maioria dos materiais utilizados na geração de RSMS são bidimensionais. Portanto seus tamanhos não afetarão adversamente os resultados do ensaio devido à sua espessura relativamente pequena.

Dito isso, inicialmente a umidade do RSMS foi ajustada para o valor de 60% na base seca e as amostras foram compactadas em cilindros de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, conforme pode ser observado na Fotografia 12.

Fotografia 12 - Corpo de prova de RSMS obtido por compressão estática – Mistura MO01



Fonte: Elaborada pela autora

Foi escolhido o teor de umidade de 60% padronizado à todas as amostras por ser um teor de umidade comumente encontrado nos resíduos *in situ*. A escolha é justificada por, além do fato que na operação do aterro não é comum o umedecimento dos RSU para controle da compactação, neste valor de umidade o peso específico seco se encontrou próximo ao peso específico seco máximo.

Deste modo, o peso específico seco, determinado previamente pelas curvas obtidas no ensaio de compactação, variou entre cada tratamento, MO01, MO02 e MO03, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Pesos específicos à umidade de 60%

	Amostra		
	MO01	MO02	MO03
Peso específico seco ( $\rho_{d,w60}$ ) em kN/m <sup>3</sup>	5,87	5,64	5,48
W em %	60,0	60,0	60,0

Fonte: Elaborada pela autora

Após essa etapa, cada corpo de prova foi extraído do molde, transferido para uma membrana de látex e colocado na câmara triaxial, conforme Fotografia 13, onde posteriormente foram levados até a condição de saturação.

Fotografia 13 - Corpo de prova na câmara triaxial antes da realização do ensaio CIU



Fonte: Elaborada pela autora

Para cada mistura proposta, MO01, MO02 e MO03, três amostras foram consolidadas previamente por 24 horas sob pressões confinantes de 70, 140 e 280 kPa. Os corpos de prova foram então cisalhados a uma taxa de deformação constante de 2,1 mm/min, medindo-se também a poropressão durante todo o cisalhamento. Na ausência de resposta de pico de cisalhamento, os ensaios foram continuados até atingirem no mínimo 15% de deformação axial, Fotografia 14.

Fotografia 14 - Corpo de prova MO02 ao final do cisalhamento



Fonte: Elaborada pela autora

Os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito, foram determinados com base nas envoltórias de rupturas modificadas definidas em termos de  $s'$  e  $t$ , conforme Equações 1 e 2.

$$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (1)$$

$$t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2)$$

Em que:

$\sigma'_1$  é a tensão normal efetiva no plano principal maior, em kPa;

$\sigma'_3$  é a tensão normal efetiva no plano principal menor, em kPa;

$\sigma_1$  é a tensão normal total no plano principal maior, em kPa e

$\sigma_3$  é a tensão normal total no plano principal menor, em kPa.

Finalmente, sendo  $\alpha'$  o coeficiente angular e  $a'$  o coeficiente linear das envoltórias modificadas, a coesão e ângulo de atrito mobilizados no corpo de prova podem ser calculados através das Equações 3 e 4.

$$\varphi' = \arcsen(tg(\alpha')) \quad (3)$$

$$c' = \frac{a'}{\cos(\varphi')} \quad (4)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados obtidos permite compreender o impacto das variações da matéria orgânica na composição dos RSMS e o comportamento destes como simulação de RSU, conforme forma de constituição e adaptações experimentais detalhados na seção anterior.

### 4.1. Ensaio de compactação

Os resultados dos ensaios de compactação na energia de Proctor Normal, Tabela 6, indicaram que o maior peso específico seco máximo ( $\rho_{d,máx}$ ) foi atingido na mistura MO01 com o valor de 6,03 kN/m<sup>3</sup>, enquanto que o menor  $\rho_{d,máx}$  dentre as amostras foi encontrado na mistura MO03 com o valor de 5,53 kN/m<sup>3</sup>.

Tabela 6 - Parâmetros de compactação dos RSMS

	Amostra		
	MO01	MO02	MO03
Peso específico seco máximo ( $\rho_{d,máx}$ ) em kN/m <sup>3</sup>	6,03	5,79	5,53
$W_{ot}$ em %	69,4	70,7	68,9

Fonte: Elaborada pela autora

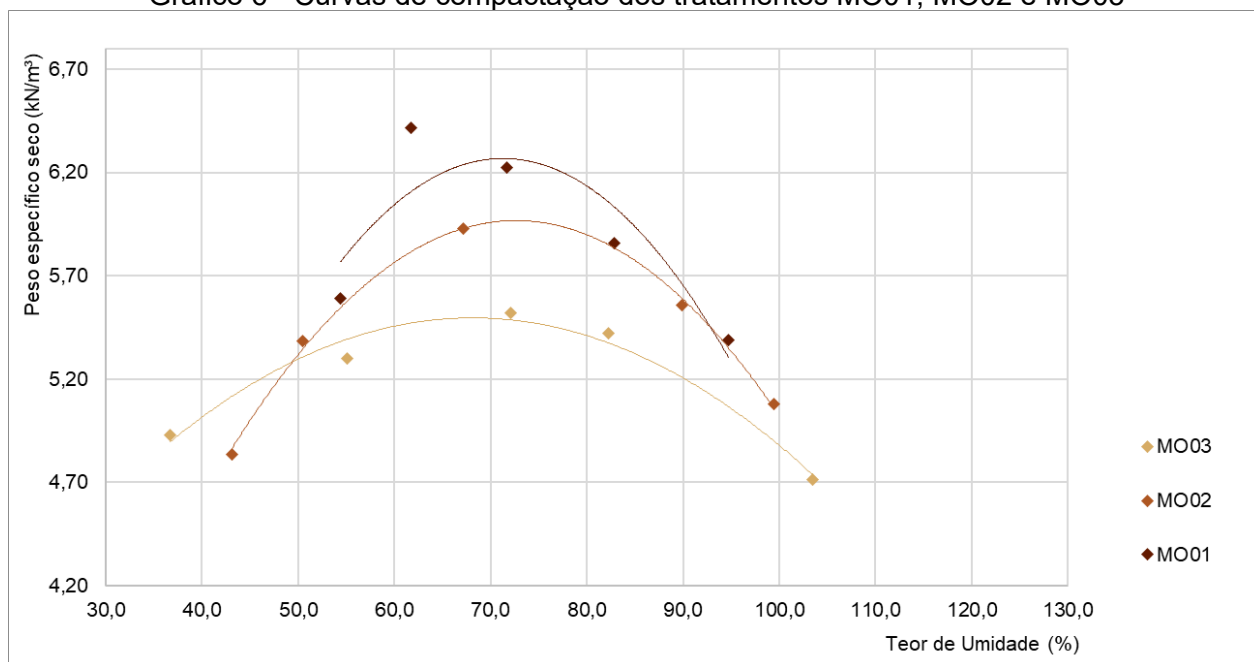
De fato, já foi observado anteriormente em outros testes de compactação de RSMS que à medida que aumenta a proporção de materiais plásticos na mistura, diminui-se o peso específico desta.

Isto ocorre, segundo Sigh e Uchimura (2023), pois o aumento do teor de material plástico deixa a amostra mais leve e, além disso, mesmo após a compactação, o corpo de prova busca recuperar a sua forma elástica, contribuindo também para a diminuição do peso específico.

Observou-se também nas curvas de compactação traçadas, Gráfico 6, que conforme aumenta a porcentagem de matéria orgânica, mais a curva tende a se aproximar do formato de sino.

Esse mesmo comportamento foi constatado no trabalho de RSMS de Sigh e Uchimura (2023) e no estudo de Pantic et al (2022), que porém utilizaram de resíduos exumados e posteriormente triados de um aterro da Sérvia em vez de resíduos sintéticos.

Gráfico 6 - Curvas de compactação dos tratamentos MO01, MO02 e MO03



Fonte: Elaborado pela autora

É importante destacar uma diferença na composição gravimétrica utilizada neste trabalho para os trabalhos de Sigh e Uchimura (2023) e Pantic et al (2022), que é a presença da fração “Rejeito” com variação de 23,3% a 27,5% da gravimetria e presente somente nesta pesquisa.

É notável que haverá diversidade nos componentes dos RSU de acordo com os hábitos e padrões de consumo de determinada população que o gera. Culturalmente, no Brasil há o descarte de papel higiênico junto aos resíduos sólidos, enquanto que na maioria dos outros países esse descarte é feito na rede de esgoto sanitário.

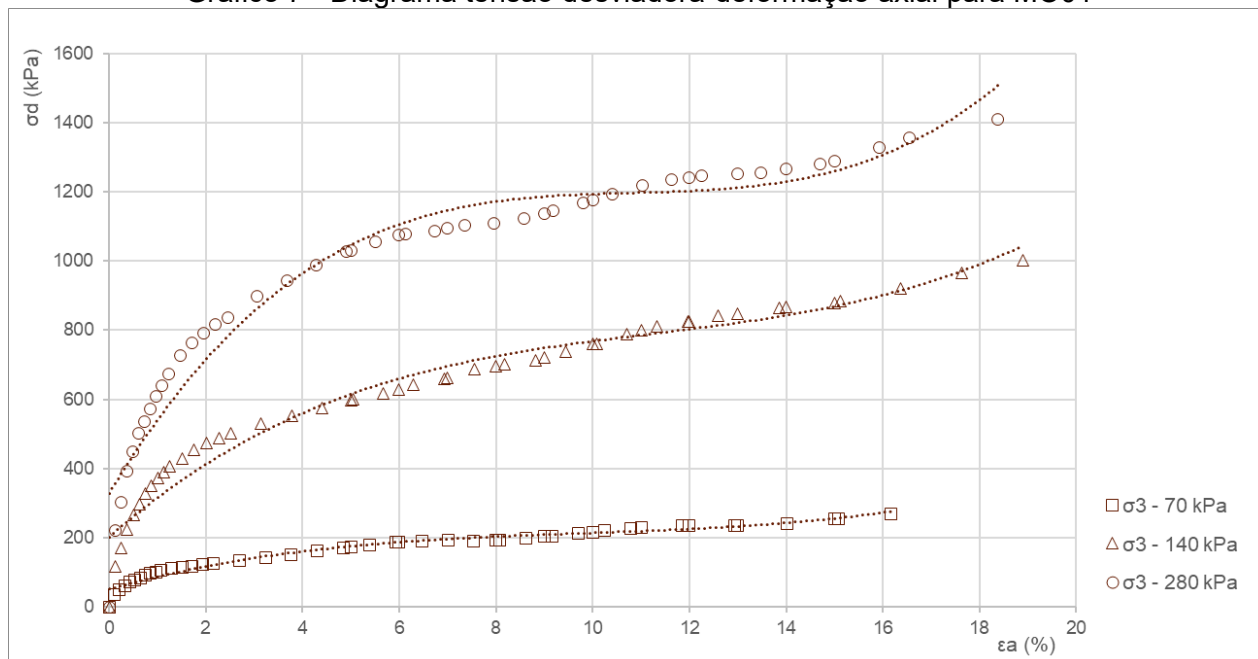
Sendo assim, é comum as tabelas de composição gravimétrica brasileiras classificarem de forma separada e com uma porcentagem relevante o grupo de rejeitos, enquanto outros países que possuem teores menores de rejeitos e os somam à fração “outros” e muitas vezes não os simulam em pesquisas.

Isso pode ser um dos fatores que explica a diferença numérica entre os teores de umidade encontrados por Sigh e Uchimura (2023), Pantic et al (2022) e este trabalho.

## 4.2. Ensaio Triaxial

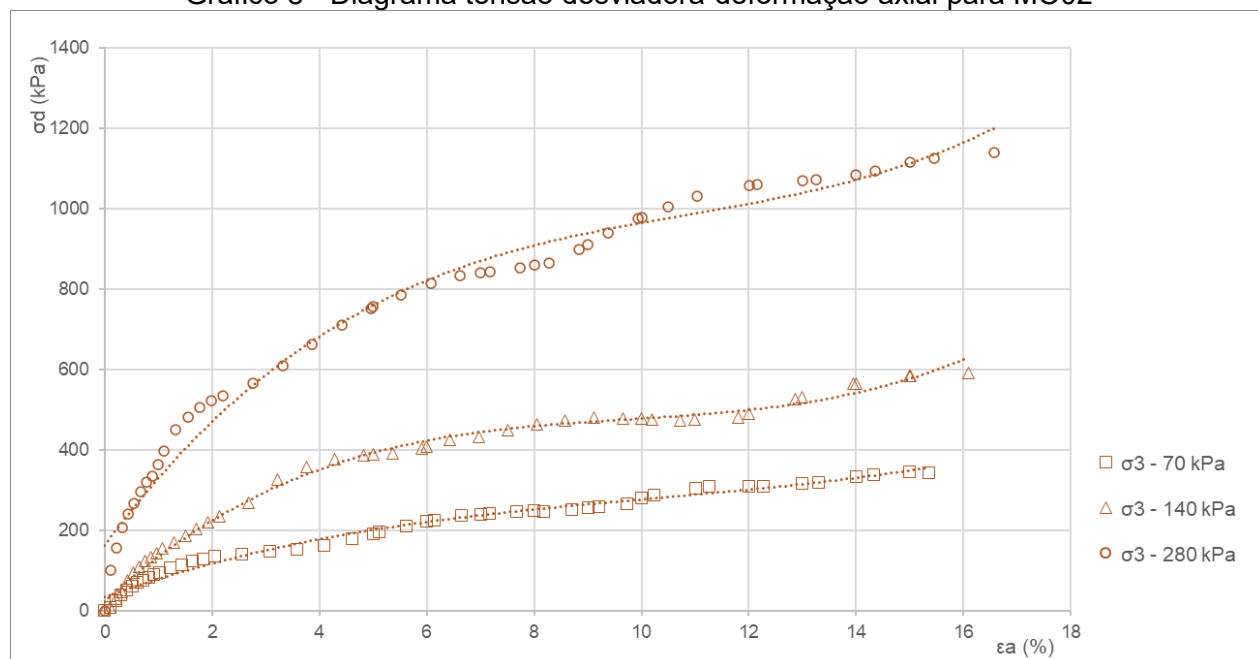
O diagrama de tensão x deformação de cada tratamento proposto está apresentado nos Gráficos 7, 8 e 9, respectivamente referentes a MO01, MO02 e MO03.

Gráfico 7 - Diagrama tensão desviadora-deformação axial para MO01



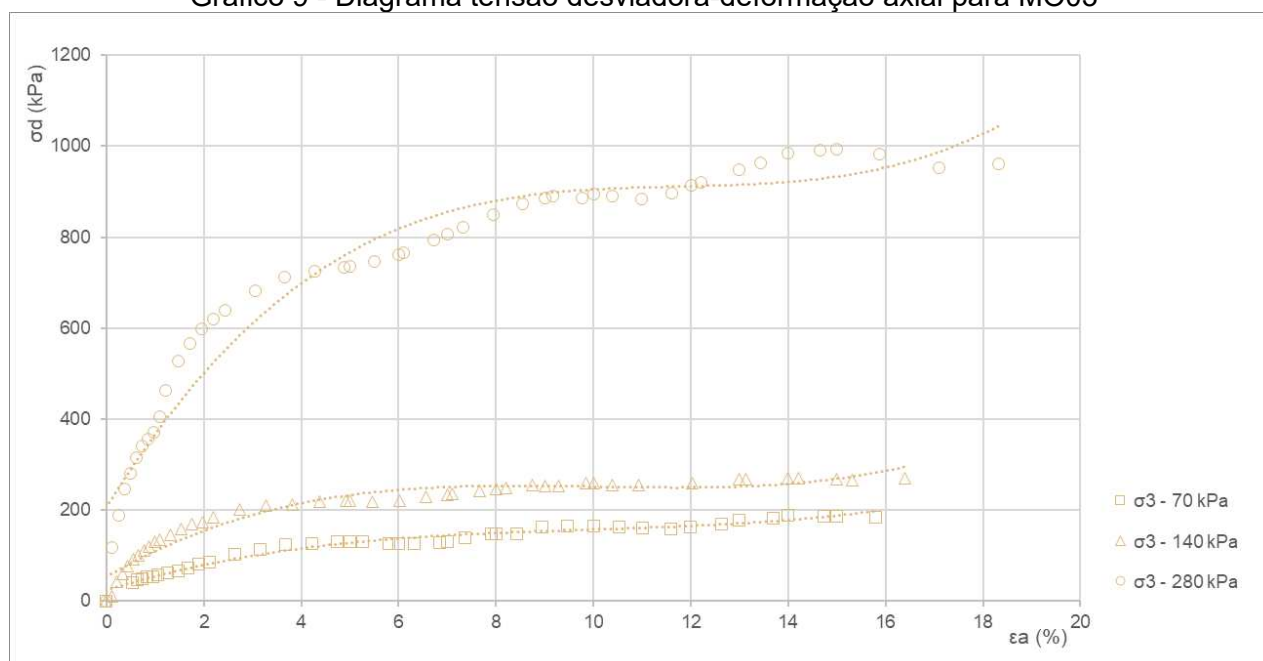
Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 8 - Diagrama tensão desviadora-deformação axial para MO02



Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 9 - Diagrama tensão desviadora-deformação axial para MO03



Fonte: Elaborado pela autora

Em todas as composições gravimétricas testadas pode ser observado o fenômeno de endurecimento por deformação, ou seja, não há resistência de pico bem definida, ocorrendo inclusive uma tendência ao aumento da tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) para maiores deformações.

Comportamentos semelhantes foram relatados por Reddy et al (2009) e Reddy et al (2011) em programas experimentais utilizando RSMS, nos quais ficou demonstrado que as propriedades de resistência ao cisalhamento do RSU dependem da deformação ao qual as amostras são submetidas, uma vez que não se é possível observar resistência de pico.

Xie et al (2002) também realizaram testes triaxiais em RSMS, destacando que mesmo para amostras de diferentes composições não foi possível observar em nenhuma delas uma resistência de pico significativa.

Bray et al (2009) já destacaram que na literatura dos resíduos sólidos urbanos se observa comumente respostas de tensão-deformação aos testes triaxiais com formato inicialmente convexo, depois quase linear e finalmente côncavo para cima.

Do mesmo modo, é possível visualizar nas curvas apresentadas nos Gráficos 7, 8 e 9 que para maiores deformações há uma curvatura ascendente sem qualquer sinal de atingir um valor assintótico.

Porém, provavelmente devido à configuração utilizada para constituir seu RSMS, as curvas de tensão-deformação de Reddy *et al* (2011) em ensaios triaxiais não apresentaram curvatura côncava para cima, como era de se esperar pelos relatos da literatura.

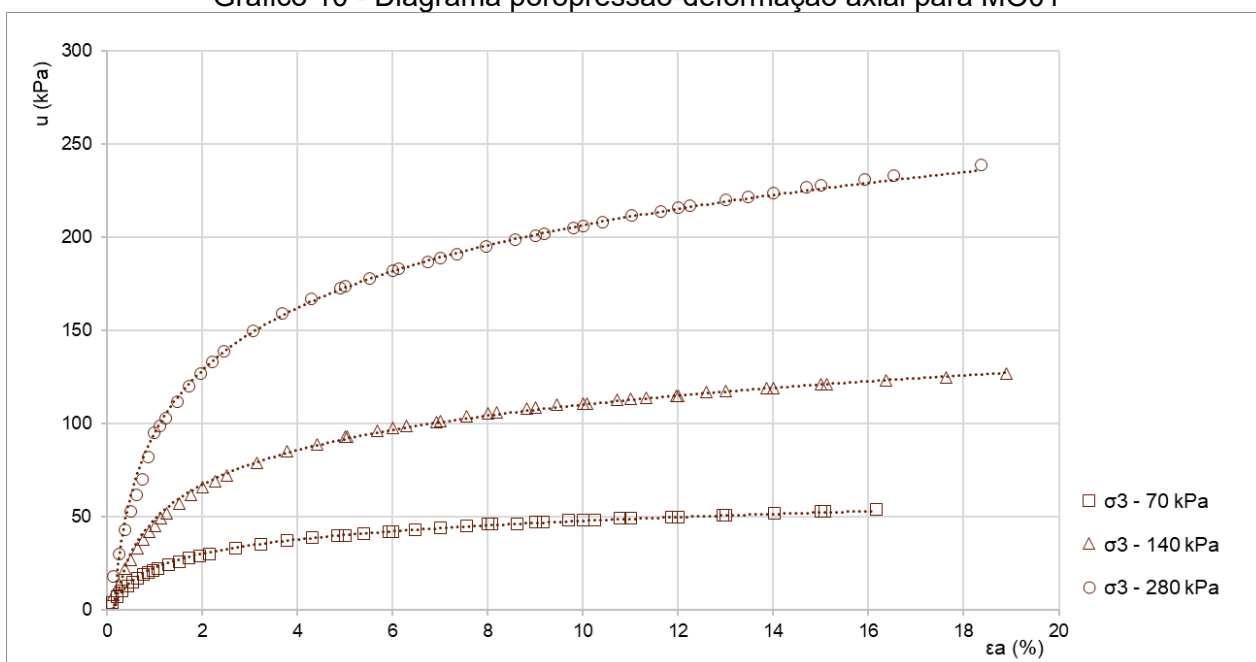
Segundo os autores, este comportamento da inclinação ascendente em maiores deformações ocorre pela presença de componentes fibrosos e de reforço que não ocorriam em seu resíduo sintético (Reddy *et al*, 2011).

O aspecto qualitativo côncavo com curvatura ascendente para grandes deformações já foi amplamente demonstrado em testes triaxiais de grande escala utilizando resíduos reais como o trabalho de Vilar e Carvalho (2004), Zekkos (2005), Bray *et al* (2009), Shariatmadari *et al* (2009) e Karimpour-Fard *et al* (2011).

A maior diversidade de materiais empregados para simulação com resíduo sólido sintético neste trabalho em relação ao trabalho de Reddy *et al* (2011), bem como a menor porcentagem de solo empregada em relação aos resíduos, podem ter contribuído para que a curva tensão-deformação tenha se aproximado de maneira qualitativa mais ao comportamento de resíduos reais.

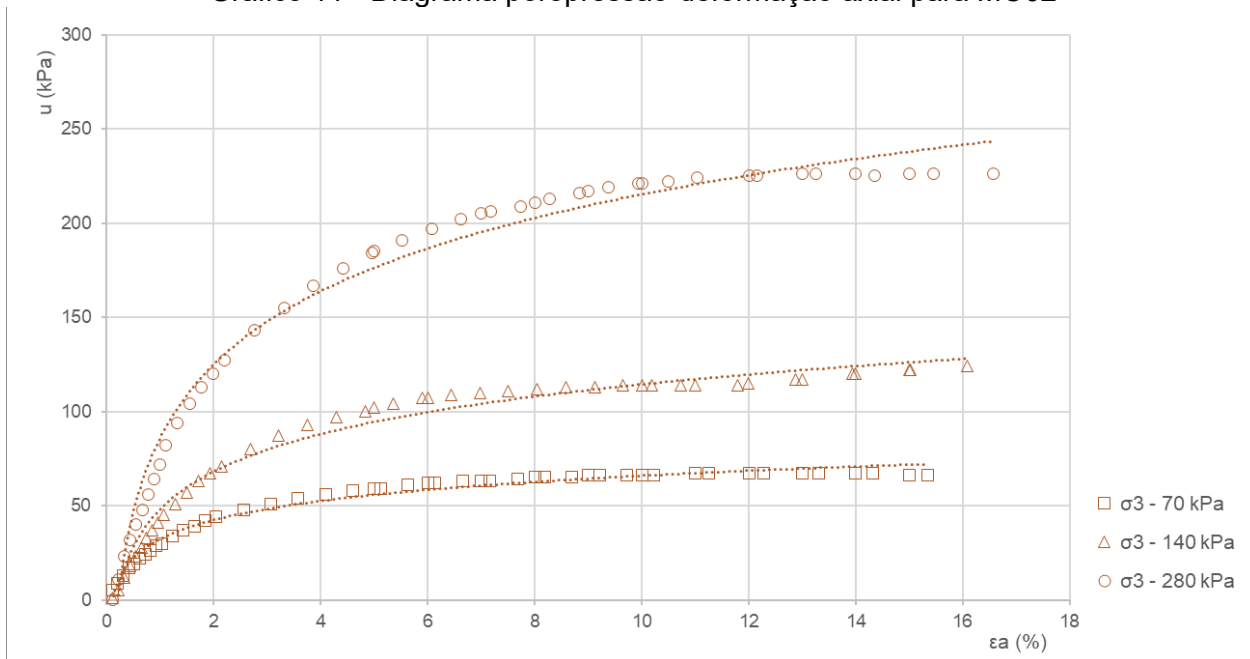
Durante o decorrer do ensaio foi medida a poropressão nas amostras e como pode ser observado nos Gráficos 10, 11 e 12.

Gráfico 10 - Diagrama poropressão-deformação axial para MO01



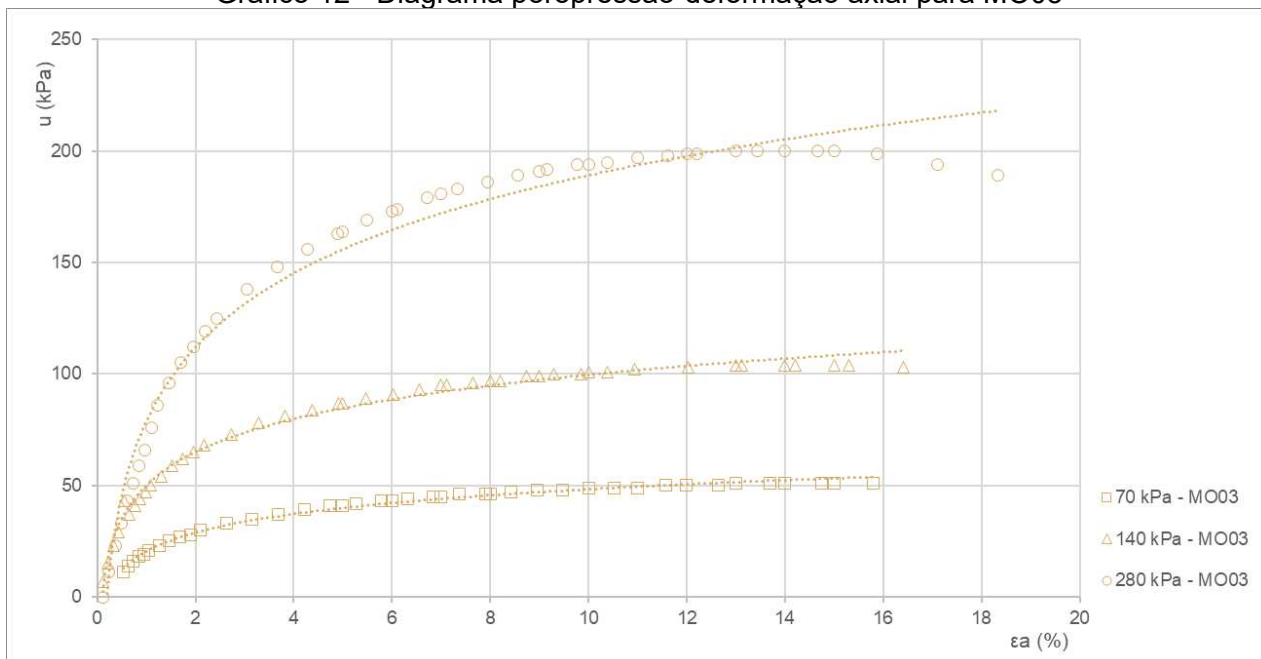
Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 11 - Diagrama poropressão-deformação axial para MO02



Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 12 - Diagrama poropressão-deformação axial para MO03



Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se que os valores possuem uma tendência a se estabilizar próximo à tensão de confinamento, principalmente no caso de MO01 e MO02.

O comportamento dos RSMS apresentados nos Gráficos de 7 a 12 é condizente com o comportamento típico dos RSU em testes triaxiais não drenados.

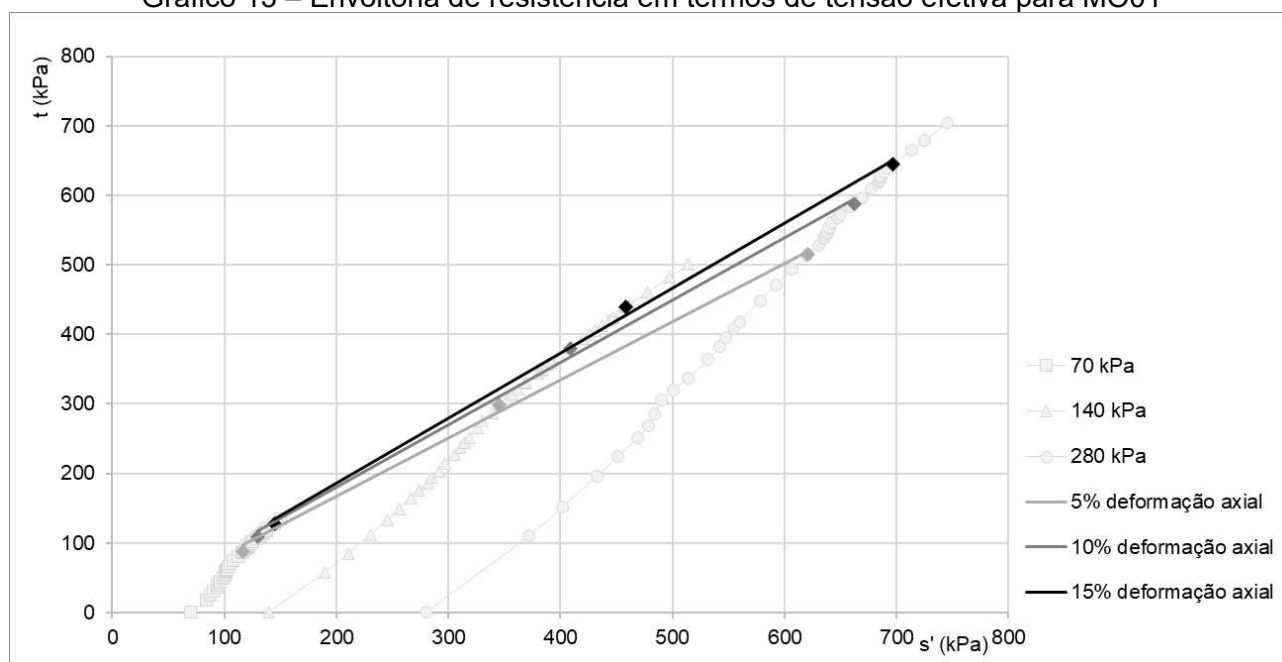
De acordo com Shariatmadari et al (2009), o nível de pressão da água dos poros dentro de amostras de RSU gerado durante a fase de cisalhamento tende a aumentar rapidamente e se estabilizar em um valor próximo à pressão de confinamento.

Para o tratamento MO03 a poropressão se estabiliza em tensões um pouco mais abaixo do que para os tratamentos anteriores, MO01 e MO02. Esse resultado é consistente, uma vez que o comportamento da estabilização da poropressão próximo à tensão de confinamento está ligado à presença de materiais compressíveis como já explicado por Shariatmadari et al (2009).

As envoltórias de resistência utilizadas para determinar os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos em testes triaxiais não drenados variaram de 5% a 15% de deformação axial, conforme orientações de projeto de Boscov (2008) já discutidas anteriormente.

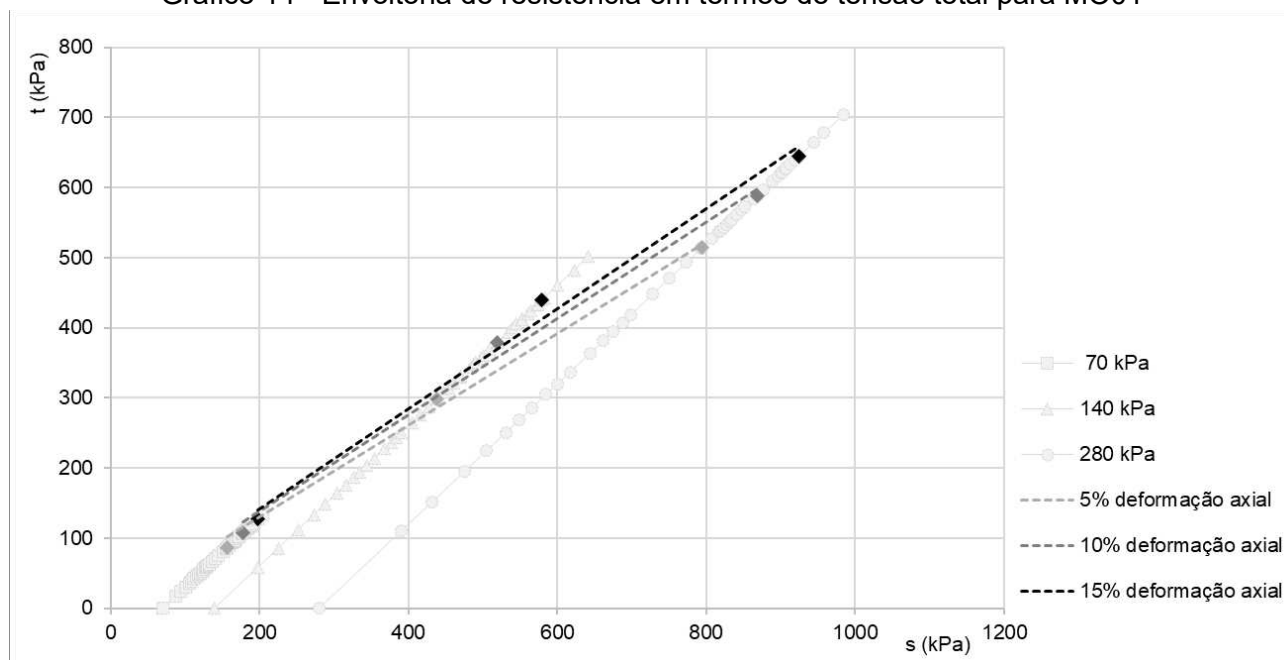
As envoltórias das misturas MO01, MO02 e MO03 para os níveis de deformação de 5%, 10% e 15% estão apresentadas do Gráfico 13 ao Gráfico 18.

Gráfico 13 – Envoltória de resistência em termos de tensão efetiva para MO01



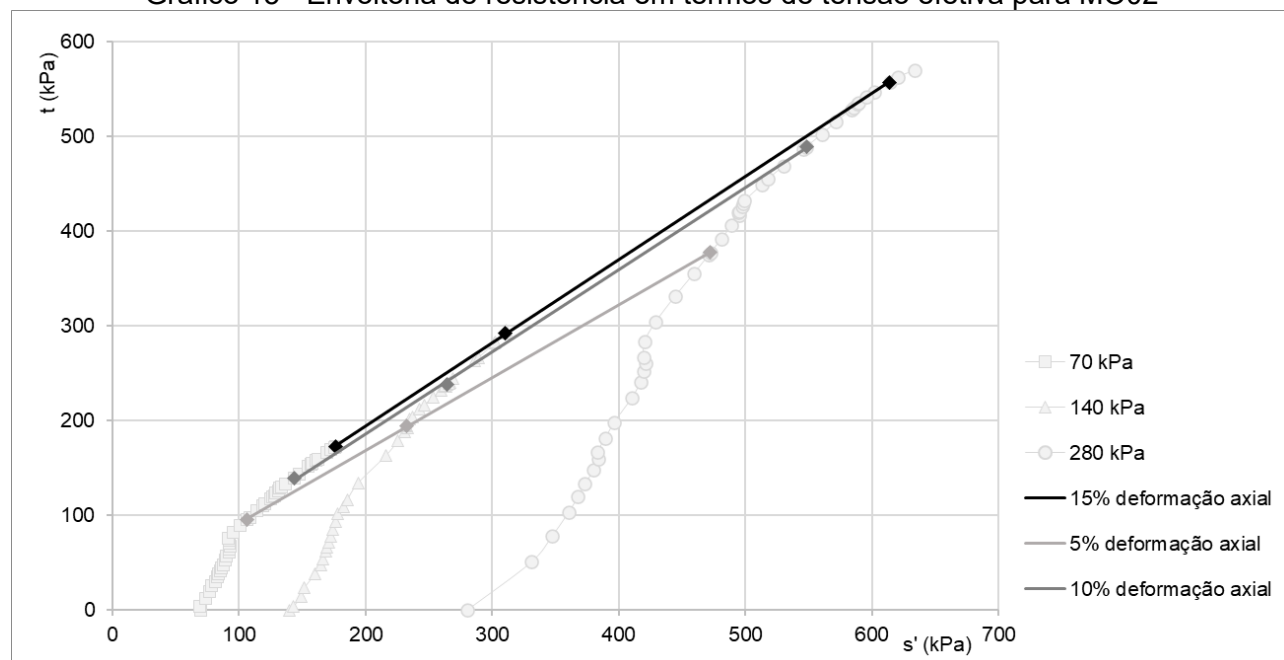
Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 14 - Envoltória de resistência em termos de tensão total para MO01



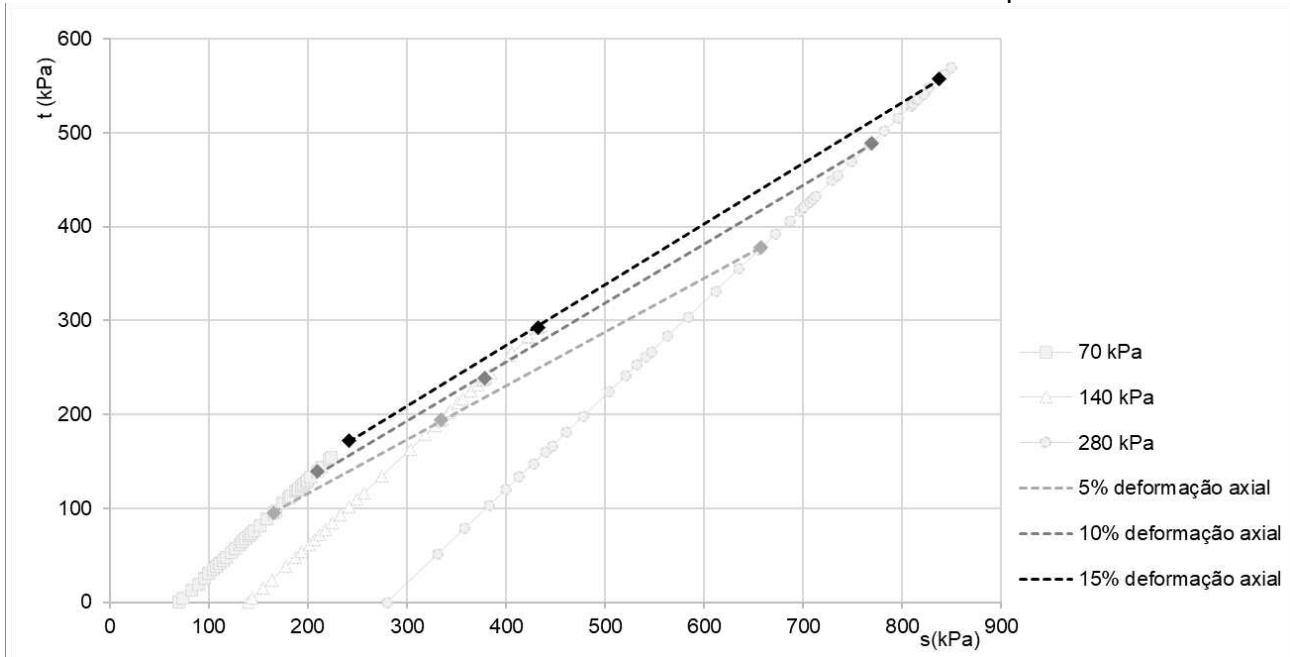
Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 15 - Envoltória de resistência em termos de tensão efetiva para MO02



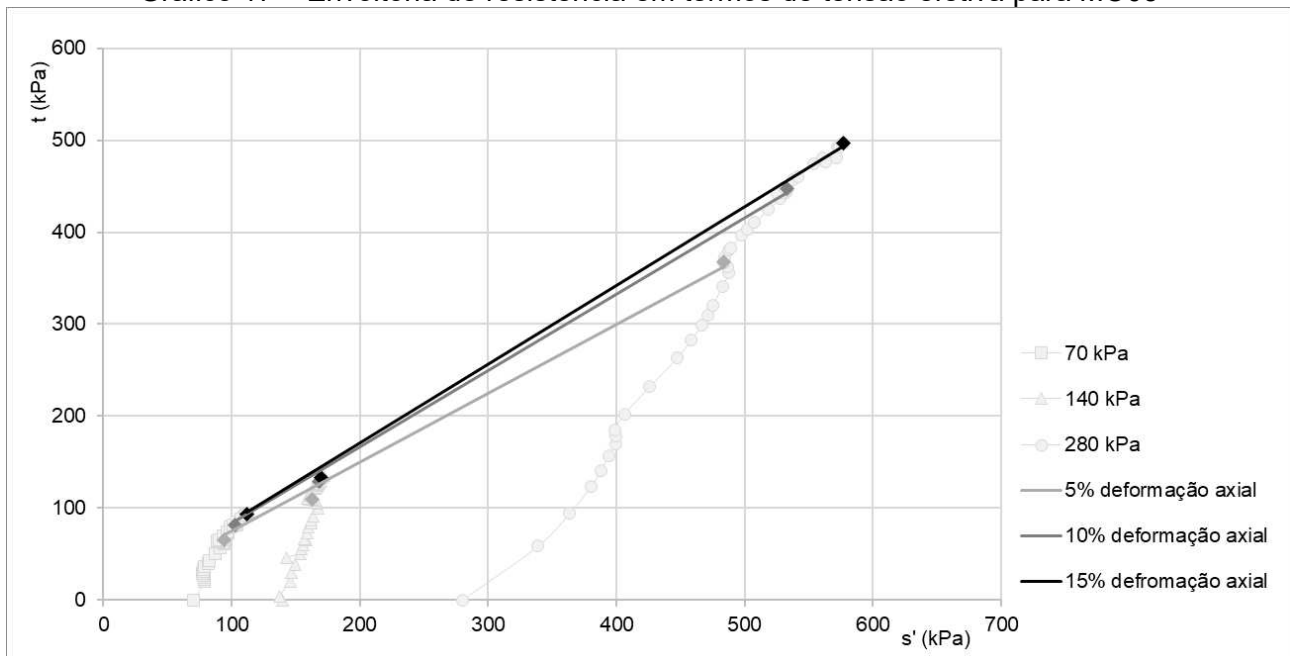
Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 16 – Envoltória de resistência em termos de tensão total para MO02



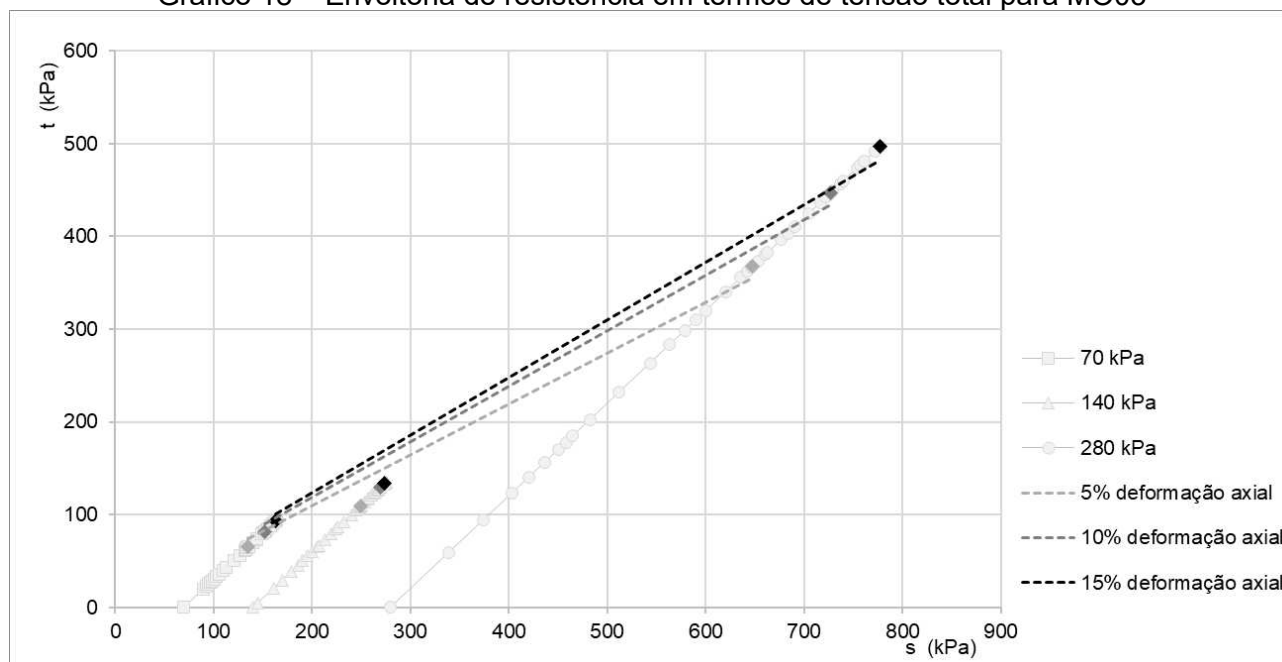
Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 17 – Envoltória de resistência em termos de tensão efetiva para MO03



Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 18 – Envoltória de resistência em termos de tensão total para MO03



Fonte: Elaborado pela autora

Os valores de coesão e ângulo de atrito, efetivos e totais, calculados a partir das linhas de máximos foram compilados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros da resistência ao cisalhamento do RSMS

Amostra	Trajetória	$\epsilon_a$ (%)	Equação (kPa)	$R^2$	Parâmetros	
					$\phi$ ou $\phi'$ (°)	$c$ ou $c'$ (kPa)
MO01	Total	5	$t = 0,6525 \cdot s$	0,9989	40,73	0,0
		10	$t = 0,6890 \cdot s$	0,9985	43,55	0,0
		15	$t = 0,7122 \cdot s$	0,9983	45,41	0,0
	Efetiva	5	$t = 0,8350 \cdot s'$	0,9994	56,62	0,0
		10	$t = 0,8976 \cdot s'$	0,9994	63,85	0,0
		15	$t = 0,9338 \cdot s'$	0,9997	69,04	0,0
MO02	Total	5	$t = 0,5725 \cdot s + 1,57$	0,9999	34,92	1,92
		10	$t = 0,6278 \cdot s + 5,04$	0,9996	38,89	6,47
		15	$t = 0,6481 \cdot s + 13,97$	0,9999	40,40	18,34
	Efetiva	5	$t = 0,7696 \cdot s' + 14,31$	0,9999	50,32	22,40
		10	$t = 0,8676 \cdot s' + 12,52$	0,9997	60,18	25,19
		15	$t = 0,8777 \cdot s' + 18,53$	1,0000	61,37	38,67
MO03	Total	5	$t = 0,5486 \cdot s$	0,9936	33,27	0,00
		10	$t = 0,5965 \cdot s$	0,9945	36,62	0,00
		15	$t = 0,6210 \cdot s$	0,9942	38,39	0,00
	Efetiva	5	$t = 0,7495 \cdot s'$	0,9986	48,55	0,00
		10	$t = 0,8311 \cdot s'$	0,9994	56,21	0,00
		15	$t = 0,8547 \cdot s'$	0,9994	58,72	0,00

Fonte: Elaborado pela autora

Segundo Nascimento (2007) o desenvolvimento de elevados valores de poropressão durante o cisalhamento dos RSU podem provocar distorções nas envoltórias efetivas das amostras.

Em seu trabalho, também foram observados elevados valores de ângulo de atrito efetivo,  $57,7^\circ$  e  $66^\circ$ , e reduzidos valores de coesão efetiva, inclusive com valores negativos, obrigando a serem feitos ajustes que forçassem as envoltórias a passar pela origem dos eixos coordenados.

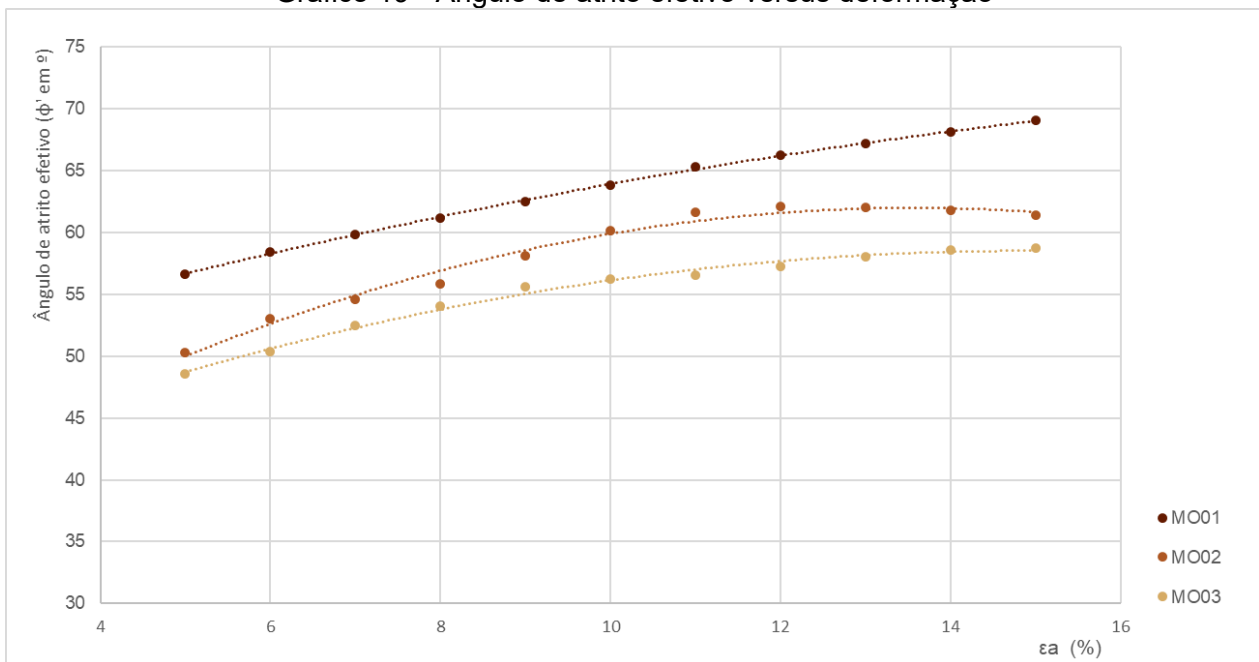
De maneira semelhante, os ensaios CIU de Vilar e Carvalho (2004) também resultaram em coesão nula e ângulos de atrito efetivos na ordem de  $48,5^\circ$ .

Reddy *et al* (2011) ao realizarem ensaios triaxiais não drenados encontraram amostras altamente coesas, porém, os próprios autores explicam que uma das prováveis causas disto foi a inclusão de solos coesivos, 20% da composição total da amostra, além da falta de material de fricção, uma vez que a fração não biodegradável foi representada por uma mistura de 40% de solos argiloso e arenoso em igual proporção.

Sabendo que os parâmetros de resistência ao cisalhamento são dependentes do nível de deformação, foi comparado o comportamento destes com a deformação variando de 5% a 15%, com incrementos de 1%.

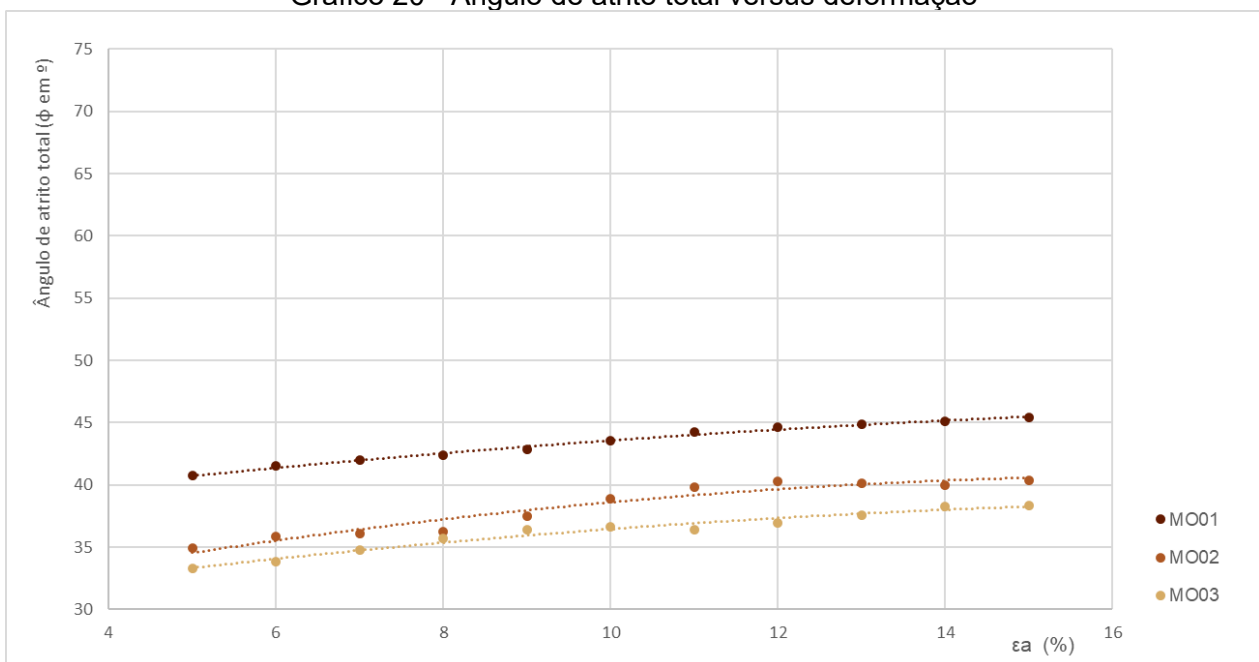
Nos Gráficos 19 e 20 são mostrados o comportamento do ângulo de atrito efetivo e total em função da deformação, respectivamente. Enquanto que, por sua vez, nos Gráficos 21 e 22 estão contidos os gráficos referentes à coesão efetiva e coesão total.

Gráfico 19 - Ângulo de atrito efetivo versus deformação



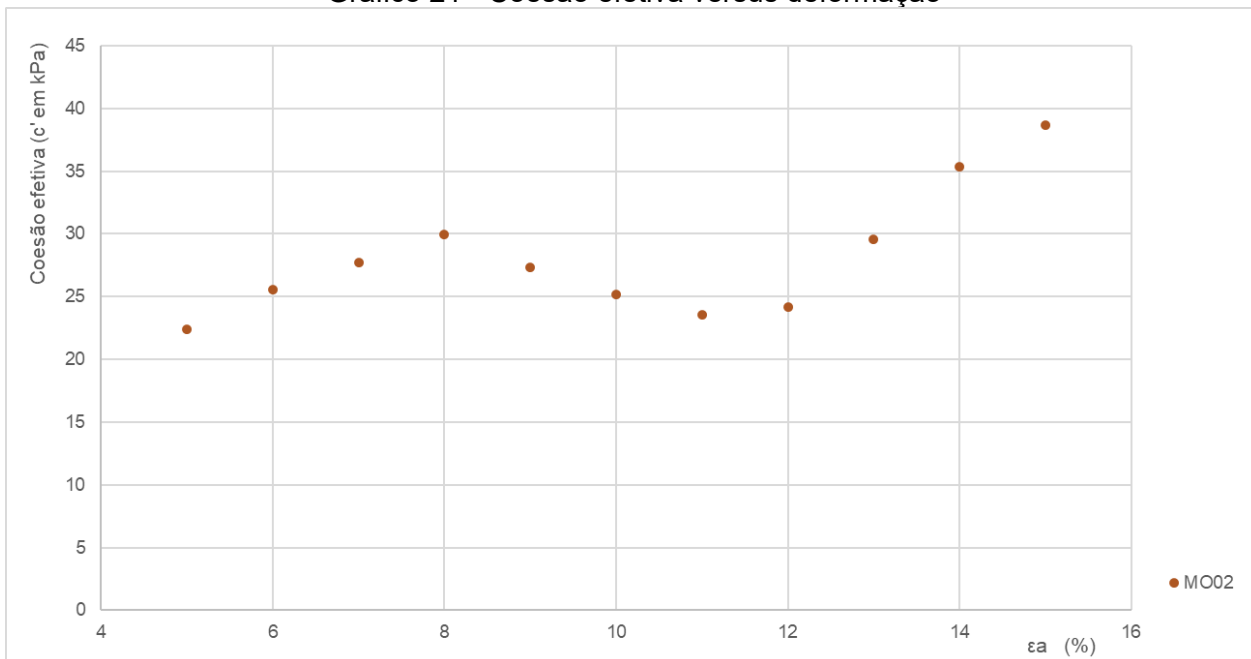
Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 20 - Ângulo de atrito total versus deformação



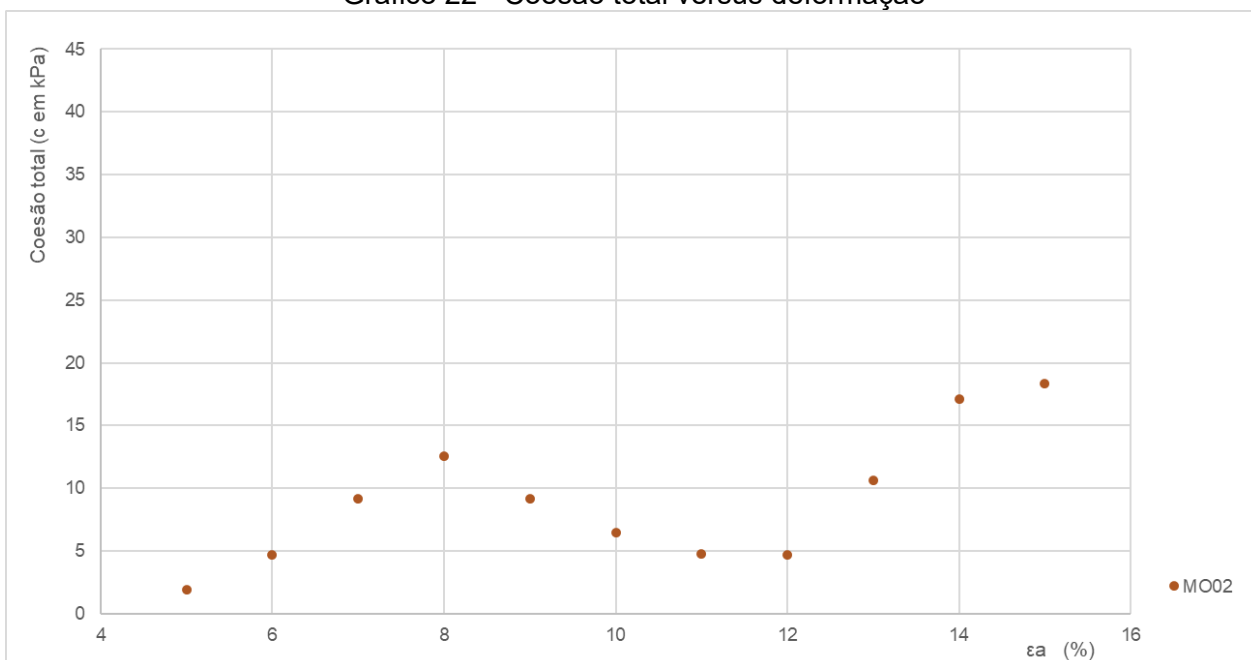
Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 21 - Coesão efetiva versus deformação



Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 22 - Coesão total versus deformação



Fonte: Elaborado pela autora

Embora um ajuste parabólico, Tabela 8, tenha sido o que melhor descreveu o comportamento dos dados para as três misturas, observa-se nos Gráficos 19 e 20 que MO01 não atingiu o ponto máximo da parábola, que MO02 já o ultrapassou e MO03 está próximo de o atingir.

Tabela 8 - Ajuste estatístico da variação do ângulo de atrito x deformação

Amostra	Trajectoria	Ajuste	R <sup>2</sup>
MO01	Total	$\phi = - 0,0189 \cdot \epsilon a^2 + 0,8540 \cdot \epsilon a + 36,927$	0,9932
	Efetiva	$\phi' = - 0,0426 \cdot \epsilon a^2 + 2,0881 \cdot \epsilon a + 47,295$	0,9995
MO02	Total	$\phi = - 0,0420 \cdot \epsilon a^2 + 1,4424 \cdot \epsilon a + 28,395$	0,9415
	Efetiva	$\phi' = - 0,1633 \cdot \epsilon a^2 + 4,4337 \cdot \epsilon a + 31,879$	0,9849
MO03	Total	$\phi = - 0,0262 \cdot \epsilon a^2 + 1,0177 \cdot \epsilon a + 28,910$	0,9649
	Efetiva	$\phi' = - 1,007 \cdot \epsilon a^2 + 2,9941 \cdot \epsilon a + 36,263$	0,9915

Fonte: Elaborado pela autora

Comparando o diagrama de tensão x deformação do Gráfico 8 com os Gráficos 19 e 22, percebe-se que para MO02 a partir de 12% de deformação há um aumento da tensão desviadora e também os valores de coesão começam uma tendência crescente a partir deste mesmo ponto.

Esse ponto, 12% de deformação da mistura MO02, situa-se provavelmente na transição da Fase I para a Fase II do proposto por Kölsch (1995), ou seja, o momento em que ocorre o aumento da contribuição da parcela de tensão de tração das fibras na resistência.

Athanasopoulos et al (2015) também defendem que a curvatura ascendente observada nas respostas tensão-deformação de testes de compressão triaxial pode ser explicada pela mobilização progressiva de materiais fibrosos durante o cisalhamento.

Portanto, é bem provável que o intercepto de coesão que aparece para a mistura MO02 seja sensível à presença de fibras no RSMS e a mobilização da resistência à tração das mesmas.

Já no tratamento MO01, que possui maior teor de matéria orgânica e, por consequência, menor proporção de materiais fibrosos, a coesão teve o valor de 0 kPa. Isso pode ter contribuído com o fato de haver uma mobilização progressiva e crescente do ângulo de atrito sem vistas de atingir o ponto máximo do ajuste proposto. Ou seja, quando não houve uma parcela de coesão válida, os dados mostram que maiores ângulos de atrito foram mobilizados.

Como também se observa a curvatura ascendente para MO01, Gráfico 7, pode-se deduzir a partir do que já foi exposto que o ângulo de atrito também é sensível à presença de fibras.

Por fim, sobre a mistura MO03 observa-se que ela também possui o valor de 0 kPa para a coesão. Porém, como já tratado por Kölsch (1995), a contribuição das fibras para a resistência ao cisalhamento dos resíduos é fruto não apenas da resistência à tração da própria fibra, mas também do ancoramento dela no maciço sanitário.

Isto posto, embora MO03 seja o tratamento com maior teor de fibras proporcionalmente ao total, é o que possui menor teor de matéria orgânica. Logo, observando como um todo, a coesão parece estar ligada não apenas à presença das fibras, mas também à capacidade de elas serem ancoradas no maciço, o que por sua vez parece ser fruto da presença de matéria orgânica.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A falta de parâmetros e critérios de projeto para as condições dos RSU brasileiros é tanto notável quanto preocupante, uma vez que as correlações empíricas empregadas muitas vezes ignoram a influência do tempo de disposição nas propriedades dos resíduos e as diferenças de características de composição, umidade e permeabilidade entre os dados.

Neste contexto, o advento do uso de RSMS é uma realidade bastante promissora, por permitir contornar vários dos desafios de experimentação como os relacionados à heterogeneidade, à grande variação na distribuição do tamanho das partículas e degradação dependente do tempo dos RSU.

Mas, principalmente, por possibilitar a realização de ensaios em escala geotécnica convencional no lugar das adaptações de equipamentos à larga escala, muitas vezes necessárias para se adequar às dimensões maiores dos RSU reais.

A presente pesquisa indica a viabilidade dos resíduos sólidos municipais sintéticos para simular os resíduos sólidos urbanos em ensaios de escala geotécnica. Os resultados mostram que as amostras de RSMS possuíram comportamento qualitativo em equipamentos geotécnicos convencionais muito semelhante aos RSU quando ensaiados em adaptações dos equipamentos em escala maior.

Foi observado que o protocolo de simulação utilizado para constituição do RSMS, com o máximo de representação das frações gravimétricas por materiais equivalentes, aproximou-se mais do comportamento do RSU real do que os protocolos anteriores da literatura, que muitas vezes possuem maior adição de solo ao corpo de prova.

A variabilidade nas composições gravimétricas revelou impactos sobre as propriedades físicas e mecânicas dos RSMS, especialmente peso específico e parâmetros de resistência ao cisalhamento. Porém, carece-se de mais estudos refinando os incrementos de variação da matéria orgânica para compreender melhor sobre como funciona este impacto nos parâmetros da resistência ao cisalhamento.

Todas as composições cisalhadas nos ensaios triaxiais exibiram ausência de resistência de pico e curvas tensão-deformação de curvatura ascendente em

grandes deformações. Esse comportamento, predito na literatura para RSU, mas pela primeira vez observado em RSMS, corrobora as evidências da atuação da fração fibrosa na resistência ao cisalhamento e reforça a necessidade de reproduzi-la adequadamente nas simulações com RSMS.

Os ângulos de atrito efetivos elevados ( $48,5^\circ$  a  $69,0^\circ$ , para 15% de deformação axial) aliados à coesão efetiva reduzida ou nula são condizentes com a natureza heterogênea e muito compressível do material. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos neste trabalho com RSMS se assemelharam mais aos resultados obtidos com RSU reais do que com os resultados anteriores de RSMS.

Essa representatividade frente às condições reais é um dos indicativos que validam o uso de RSMS como ferramenta experimental no campo de resíduos sólidos urbanos, contando ainda com as vantagens de controle sobre variáveis críticas e adequamento sanitário.

Por isso, sugere-se para pesquisas futuras a realização de ensaios de cisalhamento diretos, além de ensaios triaxiais drenados e ensaios de consolidação para as mesmas condições, com vistas a permitir a interpretação dos dados de estresse efetivo na forma modificada de Terzaghi, como proposto por Shariatmadari et al. (2009).

Finalmente, sugere-se ainda explorar diferentes variações granulométricas e modos mais mecanizados de produção das frações inorgânicas para padronizar e acelerar o processo de produção do RSMS. Isto pois, o corte manual e ajuste dimensional para adequação aos equipamentos de escala geotécnica podem alterar o comportamento original dos materiais, especialmente dos elementos fibrosos e partículas volumosas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá. 2007. 366 p. Tese de Doutorado (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 15849: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento**. Rio de Janeiro, 30 p. 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR. 7182: Solo-Ensaio de Compactação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2012**. São Paulo, 2012. 116 p. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 16 nov. 2023.

\_\_\_\_\_. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo, 2020. 52 p. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 16 nov. 2023.

\_\_\_\_\_. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. São Paulo, 2022. 64 p. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 16 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. ABREMA **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024**. São Paulo, 2024. 84 p. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 16 ago. 2025.

ASTM. D4767-11. **Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils**. Conshohocken: **ASTM International**. doi: 10.1520/D4767-11R20.

ATHANASOPOULOS, George et al. Municipal solid waste as a reinforced soil: Investigation using synthetic waste. In: **Geocongress 2008: Geotechnics of waste management and remediation**. 2008. p. 168-175.

BOSCOV, M. E. G.. **Geotecnia Ambiental**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p. ISBN 978-85-86238-73-4.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**, Brasília, 2 ago. 2010.

\_\_\_\_\_. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução Conama nº 404, de 11 de novembro de 2008**. Estabelece critérios e diretrizes

para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos. Brasília.

BRAY, Jonathan D. et al. Shear strength of municipal solid waste. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 135, n. 6, p. 709-722, 2009.

CARDIM, R. D. **Estudo da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões**. Orientador: Prof. Dr. Pedro Murrieta Santos Neto. 2008. 91 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. Orientador: Prof. Dr. Orêncio Monje Vilar. 1999. 330 p. Tese de Doutorado (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

CHO, Young Min et al. Food waste impact on municipal solid waste angle of internal friction. **Waste Management**, v. 31, n. 1, p. 26-32, 2011.

COLOMER-MENDOZA, Francisco J. et al. Influence of the design on slope stability in solid waste landfills. **Earth Sciences**, v. 2, n. 2, p. 31, 2013.

DIXON, Neil; LANGER, Ulrich; GOTTELAND, Philippe. Classification and mechanical behavior relationships for municipal solid waste: Study using synthetic wastes. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 134, n. 1, p. 79-90, 2008.

DRUDI, Kelly CR et al. Statistical model for heating value of municipal solid waste in Brazil based on gravimetric composition. **Waste management**, v. 87, p. 782-790, 2019.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. FEAM. **Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do Estado de Minas Gerais**. Fundação Estadual do Meio Ambiente. - Belo Horizonte: Feam, 2017. 25 p

GOURC, J. p.; ZEKOS, D. Geotechnical aspects: waste mechanical PROPERTIES. In: COSSU, R.; STEGMANN, R. **Solid waste landfilling: concepts, processes, technologies**. 1ª. ed. Amsterdam: Elsevier, 2019. cap. 5, p. 195-223. ISBN 978-0-12-818336-6.

HANSON, James L. et al. Compaction characteristics of municipal solid waste. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 136, n. 8, p. 1095-1102, 2010.

JAYAWEERA, Mahesh et al. Management of municipal solid waste open dumps immediately after the collapse: An integrated approach from Meethotamulla open dump, Sri Lanka. **Waste Management**, v. 95, p. 227-240, 2019.

KARIMPOUR-FARD, Mehran et al. A laboratory study on the MSW mechanical behavior in triaxial apparatus. **Waste management**, v. 31, n. 8, p. 1807-1819, 2011.

KAVAZANJIAN, Edward et al. Evaluation of MSW properties for seismic analysis. In: **Proceedings of the Specialty Conference on Geotechnical Practice in Waste Disposal. Part 1 (of 2)**. ASCE, 1995. p. 1126-1141.

KAVAZANJIAN JR, EDWARD; MATASOVIC, NEVEN; BACHUS, ROBERT C. Large-diameter static and cyclic laboratory testing of municipal solid waste. In: **Proceedings Sardinia**. 1999. p. 437-444.

KOLSCH, F. Material values for some mechanical properties of domestic waste. **5th International Landfill Symposium - Sardinia 95**, Cagliari, Itália, p. 711-729, 1995

KRAUSE, Max J. et al. Assessing moisture contributions from precipitation, waste, and leachate for active municipal solid waste landfills. **Journal of environmental management**, v. 344, p. 118443, 2023.

LEITE, Nirlania Diógenes; PAIVA, Brena Karoline Valentim; OLIVEIRA, Maria Zillene Franklin da Silva; SANTOS, Gemelle Oliveira . Influência da Política Nacional de Resíduos Sólidos sobre o número de unidades de triagem e compostagem do Brasil. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**, 30º., 16 a 19 jun. 2019, Natal, no Rio Grande do Norte. Anais. Natal, no Rio Grande do Norte, 2019.

NASCIMENTO, Júlio César Fialho do. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2007.

OJURI, Oluwapelumi O.; ADEGOKE, Peter K. Geotechnical characteristics of synthetic municipal solid waste for effective landfill design. **GEOMATE Journal**, v. 9, n. 17, p. 1418-1427, 2015.

PARANTHAMAN, Rajeevkarán; AZAM, Shahid; CHOWDHURY, Rashed H. Geotechnical evaluation of consolidation and conductivity of synthetic municipal solid waste. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 42, n. 6, p. 4401-4415, 2024.

PULAT, Hasan Firat; YUKSELEN-AKSOY, Yeliz. Compaction behavior of synthetic and natural MSW samples in different compositions. **Waste management & research**, v. 31, n. 12, p. 1255-1261, 2013.

QUEIROZ, B.P., NASCENTES, R., FERRAZ, R.L. et al. Hydraulic conductivity of compressible clayey soil stabilized with kraft black liquor and composite cement. **Environ Earth Sci** 84, 479 (2025)

- RAVITEJA, K. V. N. S.; BASHA, B. Munwar. Characterization of variability of unit weight and shear parameters of municipal solid waste. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 25, n. 2, p. 04020077, 2021.
- REDDY, Krishna et al. Geotechnical properties of synthetic municipal solid waste. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 3, n. 3, p. 429-438, 2009.
- SHARIATMADARI, Nader et al. Municipal solid waste effective stress analysis. **Waste Management**, v. 29, n. 12, p. 2918-2930, 2009.
- SINGH, Vedit; UCHIMURA, Taro. Effect of material composition on geotechnical properties—Study on synthetic municipal solid waste. **Geotechnics**, v. 3, n. 2, p. 397-415, 2023.
- SOARES, Nathália Delage. **Resistência dos resíduos sólidos urbanos em função do nível de compactação e presença de plásticos moles**. Orientadora: Profa. Dra. Rejane Nascentes. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021. 137 p. 2021.
- SUZUKI, D. K. **Verticalização de aterros sanitários por meio de reforço com geogrelhas e diques periféricos alteados pelo método de montante**. Orientador: Profa. Dra. Maria Eugenia Gimenez Boscov. 2012. 181 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- VILAR, Orencio M.; CARVALHOD, MdeF. Mechanical properties of municipal solid waste. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 32, n. 6, p. 438-449, 2004.
- VISWANADHAM, B. V. S.; JAEMON, Basil; GAJAMER, Vineet. Geotechnical Characterization of Synthetic Municipal Waste at Different Stages of Decomposition. 2023.
- XIE, Yuekai et al. Geotechnical properties of fresh municipal solid wastes with different compositions under leachate exposure. **Waste Management**, v. 149, p. 207-217, 2022.
- ZEKKOS, D. P. et al. Framework for the estimation of MSW unit weight profile. In: **Proc., 10th Int. Waste Management and Landfill Symp.** 2005. p. 3-7.
- ZEKKOS, Dimitrios et al. Unit weight of municipal solid waste. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 132, n. 10, p. 1250-1261, 2006.