XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/59

Análise Estatística Comparativa de Resultados de Cisalhamento Direto em Resíduos Sólidos Municipais Sintéticos e RSU: Perspectivas e Possibilidades de Simulação

Maria Clara Moreira Fort
Mestre em Engenharia Civil, UFV, Viçosa, Brasil, maria.c.fort@ufv.br

Rejane Nascentes
Docente, UFV, Viçosa, Brasil, rejane.nascentes@ufv.br

Roberto Lopes Ferraz
Docente, UFV, Viçosa, Brasil, rlferraz@ufv.br

RESUMO: Frente ao desafio da determinação de propriedades geotécnicas em resíduos sólidos urbanos (RSU), tem emergido em diferentes locais a aplicação dos resíduos sólidos municipais sintéticos (RSMS) como alternativa para obtenção desses parâmetros em ensaios geotécnicos convencionais. Os RSMS são materiais produzidos em laboratório a partir da mistura de diferentes elementos limpos, com composição e dimensões controladas a fim de simular o comportamento dos RSU. Este trabalho apresenta uma análise comparativa detalhada entre um banco de dados de resultados de ensaios de cisalhamento direto em RSMS e outro banco de dados, reunido por Daciolo *et al*. (2022), do mesmo ensaio utilizando RSU, com o objetivo de avaliar estatisticamente a capacidade dos RSMS em representar o comportamento mecânico dos RSU. Foram reunidas 97 observações de nove estudos internacionais com o foco da análise nos parâmetros ângulo de atrito e coesão, muito importantes para a análise de estabilidade de taludes. O ângulo de atrito dos RSMS apresentou coeficiente de variação de 32,1% (6º a 48,5º), com média de 28º, enquanto a coesão mostrou maior dispersão, com coeficiente de variação de 74,1% e média de 17,6 kPa. A coesão apresentou parâmetros de forma e escala da Weibull relativamente próximos nos dois bancos de dados, corroborando com a similaridade dos comportamentos. Para o ângulo de atrito, a distribuição normal mostrou boa adequação para aplicações práticas e testes t para médias amostrais indicaram ausência de diferença significativa entre os ângulos de atrito médios dos RSMS e RSU (valor-p=0,63). Esses resultados são os primeiros indicativos para validar o uso dos RSMS como ferramentas efetivas em estudos geotécnicos, facilitando a padronização experimental e proporcionando maior controle e reprodutibilidade em laboratório.

PALAVRAS-CHAVE: RSMS, resistência ao cisalhamento, aterros sanitários, coesão, ângulo de atrito

ABSTRACT: Faced with the challenge of determining geotechnical properties in municipal solid waste (MSW), the application of synthetic municipal solid waste (SMW) has emerged in different locations as an alternative for obtaining these parameters in conventional geotechnical tests. SMW materials are produced in the laboratory from the mixture of different clean elements, with controlled composition and dimensions in order to simulate the behavior of MSW. This work presents a detailed comparative analysis between a database of direct shear test results on SMW and another database, compiled by Daciolo et al. (2022), of the same test using MSW, with the aim of statistically evaluating the ability of SMW to represent the mechanical behavior of MSW. Ninety-seven observations from nine international studies were gathered, focusing the analysis on the friction angle and cohesion parameters, which are very important for slope stability analysis. The friction angle of the RSMS showed a coefficient of variation of 32.1% (6º to 48.5º), with an average of 28º, while cohesion showed greater dispersion, with a coefficient of variation of 74.1% and an average of 17.6 kPa. Cohesion presented relatively similar shape and Weibull scale parameters in both databases, corroborating the similarity of behaviors. For the friction angle, the normal distribution showed good suitability for practical applications, and t-tests for sample means indicated no significant difference between the average friction angles of the RSMS and RSU (p-value = 0.63). These results are the first indications to validate the use of RSMS as effective tools in geotechnical studies, facilitating experimental standardization and providing greater control and reproducibility in the laboratory.

KEYWORDS: MSWS, shear strength, landfills, cohesion, angle of friction

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da geração de resíduos *per capita*, somado ao crescimento populacional e econômico, amplia os problemas relacionados à destinação e disposição dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Estima-se que no ano de 2020 tenham sido gerados globalmente 2,1 bilhões de toneladas de resíduos sólidos, cujas projeções indicam que esta quantidade possa subir para 3,8 bilhões de toneladas anuais em 2050 (United Nations Environment Programme, 2024).

Na gestão dos RSU, os aterros sanitários têm destaque como método de disposição de resíduos sobre o solo, sendo utilizado sistematicamente sobretudo nos países em desenvolvimento (Lindamulla *et al*, 2022). 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. Entretanto, a determinação das propriedades geotécnicas dos RSU é considerada um desafio devido à heterogeneidade do material, à grande variação na distribuição do tamanho das partículas e à degradação dependente do tempo (Reddy et al, 2009).

Sem dúvidas, para obtenção dos parâmetros geotécnicos o ideal seria a realização de ensaios em materiais não perturbados, mas há obstáculos importantes como a dificuldade em se recuperar e testar amostras representativas de resíduos, devido entre outros fatores, ao grande tamanho de alguns de seus constituintes (Bray et al, 2009). Outro ponto é a grande variação entre as amostras obtidas, o que torna difícil quantificar a contribuição de cada elemento para o comportamento do global dos RSU (Dixon et al, 2008).

Buscando melhorar a obtenção destes dados, nos últimos anos tem aumentado a utilização de resíduos sólidos municipais sintéticos (RSMS) no estudo do comportamento mecânico dos RSU. Os resíduos sintéticos são aqueles produzidos em laboratório a partir da mistura de diferentes materiais e na composição desejada com a finalidade de simular RSU para a realização de testes (Singh e Uchimura, 2023).

A opção de utilizar RSMS no lugar de resíduos sólidos frescos possui diversas vantagens, podendo citar entre elas o melhor controle da composição da amostra, reduzindo a 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 (Singh e Uchimura, 2023).

Trabalhos como o de Cho et al (2011) e Pulat e Yukselen-Aksoy (2013), apontaram não haver diferença significativa no comportamento de RSMS quando comparados a faixa de valores esperados para RSU. Enquanto isso, trabalhos como o de Reddy et al (2009), Reddy et al (2011), Singh e Uchimura (2023) e Dixon (2008) destacam que alguns comportamentos destoantes entre as amostras de RSMS e a literatura podem ser explicados pela forma de constituição dos resíduos sintéticos.

Na literatura sobre resistência ao cisalhamento nos ensaios com RSU é evidente a grande dispersão dos resultados e os métodos estatísticos são pertinentes para a análise e interpretação dessas informações, proporcionando apontar padrões de comportamento da resistência ao cisalhamento de RSU e padronizar métodos experimentais (Daciolo et al, 2022).

Porém, para os RSMS ainda não há um padrão normativo ou mesmo meodológico entre os trabalhos publicados, tendo sido aplicados diferentes métodos de teste e diferentes formas de constituição dos RSMS. Isso, junto com a variabilidade de constituições dos RSU e suas variações simuladas nesses trabalhos, resultam na dispersão significativa dos dados publicados.

Portanto, este trabalho se propõe apresentar uma análise comparativa entre um banco de dados de resultados de ensaios de cisalhamento direto em RSMS e outro banco de dados, reunido por Daciolo *et al*. (2022), do mesmo ensaio porém utilizando RSU, com o objetivo de avaliar estatisticamente a capacidade dos RSMS em representar o comportamento mecânico dos RSU.

2 METODOLOGIA

Com o intuito de entender se os RSMS simulam de modo efetivo o comportamento dos RSU, formou-se um banco de dados de trabalhos com resultados de ensaios de cisalhamento direto (CD) publicados na literatura. Este tipo de ensaio foi escolhido por estar presente na maioria dos trabalhos que utilizam RSMS e por possuir aplicabilidade na prática de projetos de aterros sanitários.

Para o levantamento, foram considerados por "resíduos sólidos municipais sintéticos" 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.

Trabalhos que realizaram os ensaios em materiais triturados obtidos em aterros ou centrais de triagem, mas que não manipularam sua constituição foram excluídos desta análise, bem como os que apenas acrescentaram um único material de reforço ao solo. No total, foram analisados 9 diferentes estudos, perfazendo 102 observações e um resumo desse banco de dados está reunido na Tabela 1.

Tabela 1. Características do Banco de Dados utilizado

Referência	Nº de observações	País	Simulação
Cho et al (2011)	40	EUA	China Continental
Dixon et al (2008)	9	Reino Unido	Resíduos dos EUA + Variações na composição
Ojuri e Adegoke (2015)	2	Nigéria	Nigéria
Reddy et al (2009)	3	EUA	EUA
Reddy et al (2011)	5	EUA	Resíduos dos EUA + Resíduos degradados
Singh e Uchimura (2023)	9	Japão	Japão + Variações na composição
Viswanadham et al (2023)	3	Índia	Índia
Xie et al (2022)	5	Austrália	Austrália + Variações na composição

As variáves estudadas foram os parâmetros de resistência ao cisalhamento ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c). Quando os valores de ϕ e c não estavam disponíveis de forma tabelada em um estudo, foram obtidos analisando as curvas tensão-deformação dos testes de cisalhamento direto para a deformação no valor de 15%, devido ao comportamento do material estudado raramente apresentar ruptura na curva.

A princípio foram feitas análises estatísticas de descrição e dispersão para os parâmetros de resistência ao cisalhamento, ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) obtidos em ensaios de RSMS.

Também foi verificado os três melhores ajustes da distribuição de frequência entre Exponencial, Gama, Maior Valor Extremo, Menor Valor Extremo, Lognormal, Normal e Weibull. Tais resultados foram comparados aos resultados obtidos por Daciolo *et al* (2022) para um banco de dados de ensaios de cisalhamento direto em RSU.

3 RESULTADOS

As análises estatísticas descritivas foram compiladas na Tabela 2. Tanto o ângulo de atrito como a coesão tiveram como resultado coeficientes de variação altos, respectivamente 32,1% (variando de 6 a 48,5º) e 74,1% (variando de 0 a 49,6 kPa).

Tabela 2 – Estatísticas descritivas para os parâmetros ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) em RSMS

Estatísticas descritivas	φ (º)	c (kPa)
Tamanho da amostra (N)	97	97
Média ($\bar{x}$)	28,18	17,59
Desvio padrão (s)	9,05	13,02
Coeficiente de variação (CV)	32,1%	74,1%
Erro Padrão (SE)	0,92	1,32
Média aparada (x')	28,40	17,20
Mínimo	6	0
P15	20	3,02
Mediana (P50)	28,7	16
P85	38	33,3
Máximo	48,5	49,6

P15 = Percentil 15%; P85 = Percentil 85%

Na análise do seu banco de dados, Daciolo *et al* (2022) também encontraram valores semelhantes, Tabela 3, inclusive com a dispersão da coesão também sendo muito maior que a do ângulo de atrito.

Tabela 3 – Estatísticas descritivas para os parametros ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) do banco de dados de Daciolo et al (2022) em RSU

Estatísticas descritivas	φ (º)	c (kPa)
Tamanho da amostra (N)	313	313
Média ($\bar{x}$)	27,65	19,11
Desvio padrão (s)	10,19	15,94
Coeficiente de variação (CV)	36,9%	83,4%
Erro Padrão (SE)	0,58	0,90
Média aparada (x')	27,85	17,85
Mínimo	2,7	0
P15	16,6	2,5
Mediana (P50)	28,1	15,6
P85	38,5	34,6
Máximo	50,7	83,7

P15 = Percentil 15%; P85 = Percentil 85%

Alguns autores indicam que o RSU herda propriedades de atrito das tensões de contato e do intertravamento de material moderadamente a não biodegradável. Porém, ainda não há consenso sobre o que contribui para as propriedades coesivas nos RSU. Existe tanto a hipótese de que a coesão esteja relacionada a resíduos orgânicos, bem como alguns trabalhos relacionam a "aparente coesão" ao comportamento das fibras no maciço de resíduos (Reddy *et al,* 2009; Hettiarachchi, 2011).

Para compreender melhor o comportamento estatístico e possibilitar uma comparação válida ao banco de dados de Daciolo *et al* (2022), diferentes modelos de distribuição de função foram analisados, sendo apresentados na Tabela 4 as três funções com melhor aderência.

Tabela 4 – Resultados para os testes de qualidade ao ajuste das FDP

	φ (º)	c (kPa)
1º melhor ajuste de distribuição	Weibull	Weibull
Estatística de Anderson-Darling	0,393	1,432
Valor -p (5% de significância)	0,491	0,360
Parâmetro de localização	-	-
Parâmetro de forma	5,046	1,218
Parâmetro de escala	42,892	18,936
2º melhor ajuste de distribuição	Normal	Gumbel
Estatística de Anderson-Darling	0,455	1,690
Valor -p (5% de significância)	0,597	0,251
Parâmetro de localização	28,184	11,397
Parâmetro de forma	-	-
Parâmetro de escala	9,004	10,548
3º melhor ajuste de distribuição	Gumbel	Normal
Estatística de Anderson-Darling	0,797	1,880
Valor -p (5% de significância)	0,242	0,108
Parâmetro de localização	32,571	17,585
Parâmetro de forma	-	-
Parâmetro de escala	8,179	12,956

Para o parâmetro ângulo de atrito, o melhor ajuste foi o de Weibull, com estatística Anderson-Darling de 0,393 e valor-p significativo, 0,491. O parâmetro de forma elevado, 5,046, sugere uma distribuição menos assimétrica que a coesão, o que está alinhado com a menor dispersão observada no ângulo de atrito em relação à coesão.

Entretanto, a distribuição normal também pode ser considerada uma alternativa adequada para modelar o ângulo de atrito (φ) no banco de dados de RSMS, pois apresentou ajuste estatisticamente aceitável para o parâmetro. Por isso, apesar da distribuição Weibull ter apresentado melhor ajuste estatístico com base nos critérios Anderson-Darling e valor-p, a distribuição normal segue sendo uma alternativa válida, principalmente para fins práticos de comparação.

A distribuição Weibull destacou-se como o melhor ajuste também para a variável Coesão, conforme evidenciado pela estatística Anderson-Darling relativamente baixa, 1,432, e valor-p significativo, 0,360, indicando boa aderência dos dados a essa distribuição. A Weibull é uma distribuição flexível que permite modelar dados com assimetria positiva e cauda mais longa, característica observada neste banco de dados. Justamente por essas características, o segundo melhor ajuste para a coesão foi a distribuição Gumbel de maior valor extremo, que se mostra adequada em modelar os valores elevados raros da coesão no banco de dados. Já a distribuição Normal, no caso da coesão, aparece apenas em terceiro lugar, por ser menos eficiente para capturar os valores extremos e assimetria presentes nos dados.

Enquanto isso, no banco de dados de Daciolo *et al* (2022), para o ângulo de atrito, há uma boa aderência à distribuição Normal, com estatística de Anderson-Darling de 1,021 e valor -p significativo, 0,011, com a função de Weibull como segundo melhor ajuste do banco de dados de ângulo de atrito, com uma estatística AD de 1,670.

Por sua vez, para o parâmetro de coesão do banco de dados de Daciolo *et al* (2022) houve boa aderência ao PDF de Weibull, com estatística AD de 0,851 e valor de p de 0,028, sendo o segundo melhor ajuste com a PDF Gamma (estatística AD de 1,368).

Para o ângulo de atrito, como os dois bancos de dados permitem ser descritos pela distribuição normal, realizou-se um Teste t de Student para duas médias amostrais com 95% de confiança, que apresentou um valor-p de 0,63, indicando não haver diferença significativa entre as médias.

Uma análise de diagrama de caixa (boxplot), Figura 1, permite observar que o comportamento do ângulo de atrito do presente banco de dados obtido em RSMS é semelhante ao comportamento do banco de dados obtidos por Daciolo et al (2022), com forte similaridade na mediana, dispersão e amplitude interquartil.

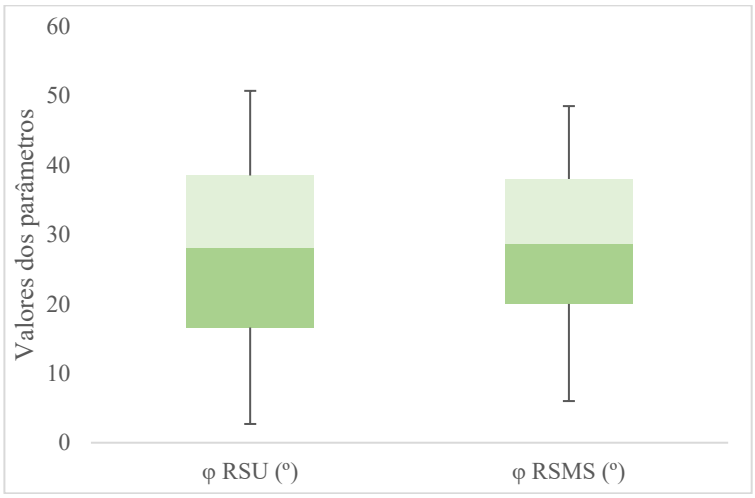


Figura 1 - Distribuição comparativa do ângulo de atrito (φ) para os bancos de dados RSU e RSMS

A FDP de Weibull para o banco de dados de Daciolo *et al* (2022) possui parâmetro de forma igual a 1,305 e parâmetro de escala de 22,459. Ao comparar com o banco de dados deste trabalho, percebe-se que a diferença relativa no parâmetro de forma é cerca de 6,9%, enquanto que para o parâmetro de escala é aproximadamente 17%. Os parâmetros da distribuição de Weibull, especificamente o parâmetro de forma (k) e o parâmetro de escala (λ), são essenciais para descrever o comportamento probabilístico da variável coesão.

No caso dos bancos analisados, a diferença relativa entre os parâmetros de forma foi apenas de 6,9%, e para os parâmetros de escala cerca de 17% para o parâmetro de forma.

Assim, a similaridade observada entre os parâmetros Weibull da coesão nos dois bancos de dados analisados pode ser observada na Figura 2.

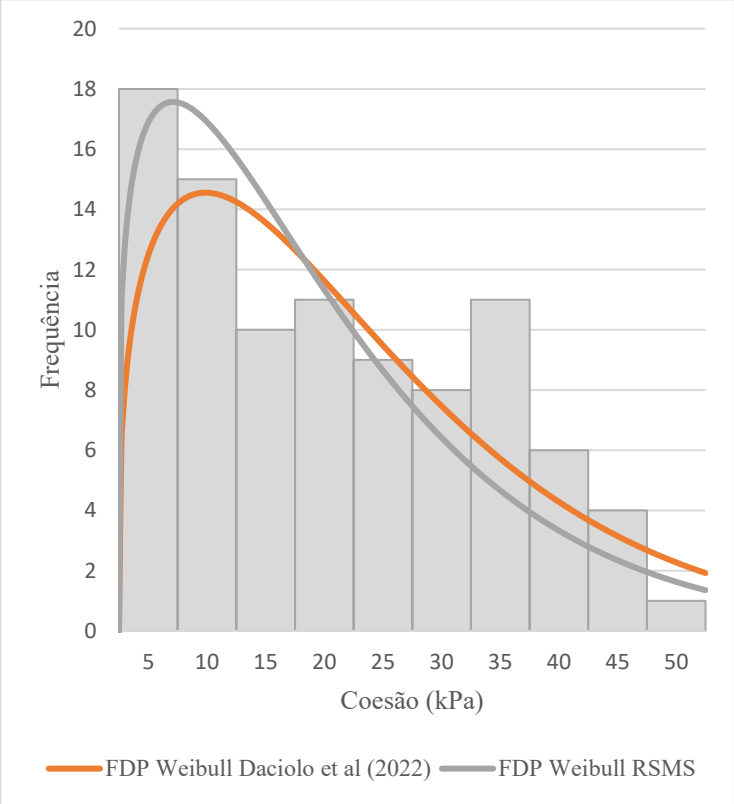


Figura 2: Frequência da coesão em RSMS e comparação das funções de densidade de probabilidade Weibull ajustadas para coesão (kPa)

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo indicam que os resíduos sólidos municipais sintéticos (RSMS) apresentam capacidade consistente de reproduzir o comportamento em ensaios de cislhamento direto observado em resíduos sólidos urbanos (RSU), especialmente no que se refere aos parâmetros ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c). A convergência entre as estatísticas descritivas dos dois conjuntos de dados, mesmo diante da elevada variabilidade inerente ao comportamento dos resíduos, corrobora a validade dos RSMS como modelos representativos para a modelagem geotécnica de aterros sanitários.

A análise das distribuições de densidade de probabilidade (FDP) demonstrou que a distribuição normal fornece um ajuste adequado para o ângulo de atrito dos RSMS, permitindo seu uso em aplicações práticas e em procedimentos de verificação com base em testes de hipóteses. Para a coesão, a aderência da distribuição de Weibull e a similaridade dos parâmetros de forma e escala em relação ao banco de dados de RSU compilado por Daciolo *et al* (2022) evidenciam uma forte convergência estatística entre ambos.

Em conjunto, os resultados de estatística descritiva, ajuste de distribuições de probabilidade e comparação entre bancos de dados apontam que os RSMS constituem uma alternativa tecnicamente viável para a simulação de RSU em ensaios de cisalhamento direto, contribuindo para maior controle experimental, padronização metodológica e reprodutibilidade em laboratório.

Do ponto de vista aplicado, tal constatação é um indício que o emprego de RSMS em estudos de estabilidade de taludes em aterros sanitários é bastante promissor, reduzindo limitações operacionais, de segurança e de amostragem associadas ao uso de resíduos reais. Recomenda-se, contudo, a ampliação de

estudos envolvendo diferentes configurações de composição sintética, condições de tensão e estados de degradação, de modo a consolidar faixas de projeto e diretrizes normativas específicas para o uso de RSMS em análises geotécnicas de aterros.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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.

DACIOLO, Leonardo Vinícius Paixão; DE SOUZA CORREIA, Natalia; BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. Extensive database of MSW shear strength parameters obtained from laboratorial direct shear tests: Proposal for data classification. **Waste Management**, v. 140, p. 245-259, 2022.

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.

LINDAMULLA, Lahiru et al. Municipal solid waste landfill leachate characteristics and their treatment options in tropical countries. **Current pollution reports**, v. 8, n. 3, p. 273-287, 2022.

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.

REDDY, Krishna et al. Geotechnical properties of synthetic municipal solid waste. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 3, n. 3, p. 429-438, 2009.

REDDY, Krishna R. et al. Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation. **Waste management**, v. 31, n. 11, p. 2275-2286, 2011.

SINGH, Vidit; UCHIMURA, Taro. Effect of material composition on geotechnical properties—Study on synthetic municipal solid waste. **Geotechnics**, v. 3, n. 2, p. 397-415, 2023.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2024). **Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource**. Nairobi. https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939 DOI: https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939.