

Modelos de previsão da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos

Models for predicting the shear strength of municipal solid waste

Claudio Luis de Araujo Neto¹; Victor Emmanuel Avelino Gomes Bahia²; Márcio Camargo de Melo³; Veruschka Escarião Dessoles Monteiro⁴; William de Paiva⁵

¹ Universidade Federal do Maranhão, Campus de Balsas, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Balsas/MA, Brasil. Email: claudio.neto@ufma.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7281-0705>

² Universidade Federal de Campina, Campus Campina Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Campina Grande/PB, Brasil. Email: victorbahiatreze@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5406-3615>

³ Universidade Federal de Campina, Campus Campina Grande. Departamento de Engenharia Civil, Campina Grande/PB, Brasil. Email: melomec90@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6215-8100>

⁴ Universidade Federal de Campina, Campus Campina Grande. Departamento de Engenharia Civil, Campina Grande/PB, Brasil. Email: veruschkamonteiro@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7714-5692>

⁵ Universidade Estadual da Paraíba, Campus Campina Grande. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campina Grande/PB, Brasil. Email: wpaiva461@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0220-1247>

Resumo: A estabilidade de taludes em aterros sanitários frequentemente é comprometida por estimativas imprecisas dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos (RSU), os quais são heterogêneos e dinâmicos. Neste contexto, o presente estudo objetiva desenvolver modelos estatísticos capazes de predizer parâmetros geomecânicos (tensão cisalhante, coesão interceptada e ângulo de atrito) de RSU com diferentes idades, teores de umidade e pesos específicos, em condições saturadas e não saturadas. O campo experimental foi o Aterro Sanitário de Campina Grande-PB. A metodologia baseou-se em ensaios de cisalhamento direto, seguindo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, com delineamento composto central e variáveis controladas. Os modelos obtidos demonstraram elevada acurácia estatística e se revelaram instrumentos eficazes na estimativa dos parâmetros de resistência dos RSU, podendo subsidiar projetos e operações mais seguros e economicamente viáveis em aterros sanitários.

Palavras-chaves: Resistência ao cisalhamento; Resíduos Sólidos Urbanos; Modelo constitutivo.

Abstract: The stability of landfill slopes is often compromised by inaccurate estimates of the shear strength parameters of urban solid waste (MSW), which are heterogeneous and dynamic. In this context, the present study aims to develop statistical models capable of predicting geomechanical parameters (shear stress, intercepted cohesion and friction angle) of MSW with different ages, moisture contents and specific weights, under saturated and unsaturated conditions. The experimental site was the Sanitary Landfill of Campina Grande-PB. The methodology was based on direct shear tests, following the Mohr-Coulomb rupture criterion, with a central composite design and controlled variables. The models obtained demonstrated high statistical accuracy and proved to be effective instruments in estimating the strength parameters of MSW, and can support safer and more economically viable designs and operations in landfills.

Keywords: Shear strength; Urban Solid Waste; Constitutive model.

1. Introdução

A resistência ao cisalhamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é um parâmetro indispensável na análise da estabilidade de taludes de Aterros Sanitários. Contudo, há diversos desafios na obtenção desse parâmetro derivados de fatores como características dos resíduos, processos biodegradativos e operação do aterro sanitário. Além disso, de acordo com Norberto *et al.* (2020), os RSU são constituídos por materiais heterogêneos e cada componente trabalha de uma forma diferente e sofre alterações no decorrer do tempo.

Modelos de previsão da resistência ao cisalhamento dos RSU surgiram ao longo do tempo, autores como Stoll (1971), Dixon e Jones (2005), Remédio (2014), Norberto *et al.* (2020), Sheng *et al.* (2021) e Wang *et al.* (2024) estudaram apenas os aspectos geomecânicos da estabilidade de aterros sanitários sem levar em consideração os processos de transformação dos resíduos. Porém, há a necessidade de uma melhor investigação e representação da variabilidade dos parâmetros que influenciam a resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos, como a idade, peso específico e umidade.

De acordo com Landva e Clark (1986), Faria (2002), Loureiro (2005) e Khaleghi *et al.* (2024) a estabilidade dos maciços sanitários é influenciada pelos processos biodegradativos dos resíduos. Objetivando a redução do número de rupturas dos maciços, é preciso observar também as mudanças dos parâmetros de resistência ao cisalhamento que acontecem ao decorrer do envelhecimento dos resíduos aterrados.

A resistência ao cisalhamento e a vida útil de um aterro sanitário sofrem influência direta do peso específico dos RSU (Hanson *et al.*, 2010; Karimpour-Fard *et al.*, 2021) e também da umidade do maciço sanitário. A presença de líquidos no interior do maciço sanitário pode reduzir a tensão efetiva e, consequentemente, resultar em menores valores de resistência ao cisalhamento (Martins, 2006).

O peso específico dos resíduos, além de ser uma ferramenta de caracterização quantitativa dos RSU gerados por uma determinada população (Ayuba *et al.*, 2013), pode ser usado na obtenção de outras características físicas dos resíduos, tais como índice de vazios, porosidade e grau de saturação, além de ser variável importante em estudos da estabilidade de taludes de aterros sanitários (Hettiarachchi *et al.*, 2007; Reddy *et al.*, 2011; Bareither *et al.*, 2012; Karimpour-Fard *et al.*, 2021). Vale destacar que o peso específico dos resíduos aterrados varia ao longo do tempo, interferindo, consequentemente, na resistência ao cisalhamento dos resíduos.

Segundo Boscov (2008) e Andrade (2018), a umidade dos RSU é um parâmetro difícil de ser determinado, pois seus diversos componentes possuem diferentes teores de água. Por meio da umidade dos resíduos no maciço sanitário pode-se analisar se as condições do meio são favoráveis ou não à biodegradação. Richard *et al.* (2019) afirmam que materiais com 30% de umidade inibem a atividade microbiana, sendo que, um meio com umidade acima de 65% proporciona uma decomposição lenta.

Levando em consideração diversos estudos que analisaram a resistência ao cisalhamento de resíduos, como Zekkos *et al.* (2010), Bareither *et al.* (2012), Shariatmadari *et al.* (2017), Alidoust *et al.* (2018), Pulat e Yukselen-Aksoy (2019), Alidoust *et al.* (2021), Dehdari (2022), Xie *et al.* (2022), Fei *et al.* (2023), Norberto *et al.* (2024) e Chen *et al.* (2024) nota-se que há consideráveis dificuldades e limitações para um entendimento mais completo e viável sobre o comportamento dos RSU em relação a resistência ao cisalhamento. O comportamento dos RSU pode variar enormemente de local para local, além da avaliação das propriedades dos RSU baseada em laboratório ser altamente complexa e demorada. Em comparação com os testes de laboratório e de campo, a modelagem preditiva pode oferecer resultados mais rápidos e com menor custo para estimar as propriedades dos RSU, sendo aplicada a uma gama mais ampla de problemas.

Devido a necessidade de determinar com precisão os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, bem como as dificuldades relacionadas aos testes de campo e de laboratório, considera-se necessária a avaliação de métodos alternativos para determinação desses parâmetros. Quando essas características não são consideradas, o uso dos parâmetros de resistência ao cisalhamento pode ficar inviabilizado, uma vez que, as características dos resíduos são desconhecidas. Por isso, a seleção de parâmetros de resistência ao cisalhamento, apropriados para um aterro sanitário, é de extrema importância, considerando que essas obras devem seguir padrões técnicos rigorosos e caso não sejam operados corretamente acarretam sérios danos socioambientais (Gulnihal *et al.*, 2021; Osra *et al.*, 2021; Morita *et al.*, 2021; Hussein *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2021; Chetri e Reddy, 2021; Lindamulla *et al.*, 2022; Vaverková *et al.*, 2022; Bahia *et al.*, 2024).

Há uma lacuna na aplicabilidade da inteligência artificial às propriedades dinâmicas de RSU. Assim, as tentativas de desenvolver um método confiável para prever os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos resíduos são novas e podem adicionar mais informações sobre o projeto de aterros sanitários. Por isso, este trabalho tem como objetivo desenvolver modelos estatísticos para prever os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU depositados em Aterro Sanitário, levando em consideração as alterações de suas propriedades.

2. Metodologia

2.1 Campo experimental e coleta de resíduos

O campo experimental para o desenvolvimento desta pesquisa refere-se ao Aterro Sanitário em Campina Grande (ASCG), que está localizado a 10 km da área urbana desse município, que corresponde a Fazenda Logradouro II, distrito de Catolé de Boa Vista, município de Campina Grande, Paraíba.

Foram coletados resíduos recém aterrados, com tempo de disposição na Célula inferior a 8 dias. Isso ocorreu por meio da coleta de seis amostras de resíduos no local de disposição mais recente, que correspondem aos RSU dispostos no ASCG no período de uma semana, garantido assim, a participação e disposição de resíduos de todos os municípios contribuintes.

Em seguida, conforme histórico de disposição dos resíduos nas Células do Aterro Sanitário, foram coletados resíduos com 1 e 2 anos de aterramento. A localização dos pontos de coleta dos RSU foi definida de acordo com as informações relacionadas aos períodos de disposição dos resíduos de cada região do Aterro, assim, definindo onde estariam localizados os RSU com 1 e 2 anos de aterramento no empreendimento. A idade das amostras de RSU foi confirmada pelas datas que estavam legíveis em documentos, bem como pelas datas de fabricação e/ou validade escritas nas embalagens de produtos coletados nos pontos pré-definidos. A Figura 1 ilustra a localização dos pontos de coleta dos resíduos e a Figura 2 exibe o ASCG e seu georreferenciamento.

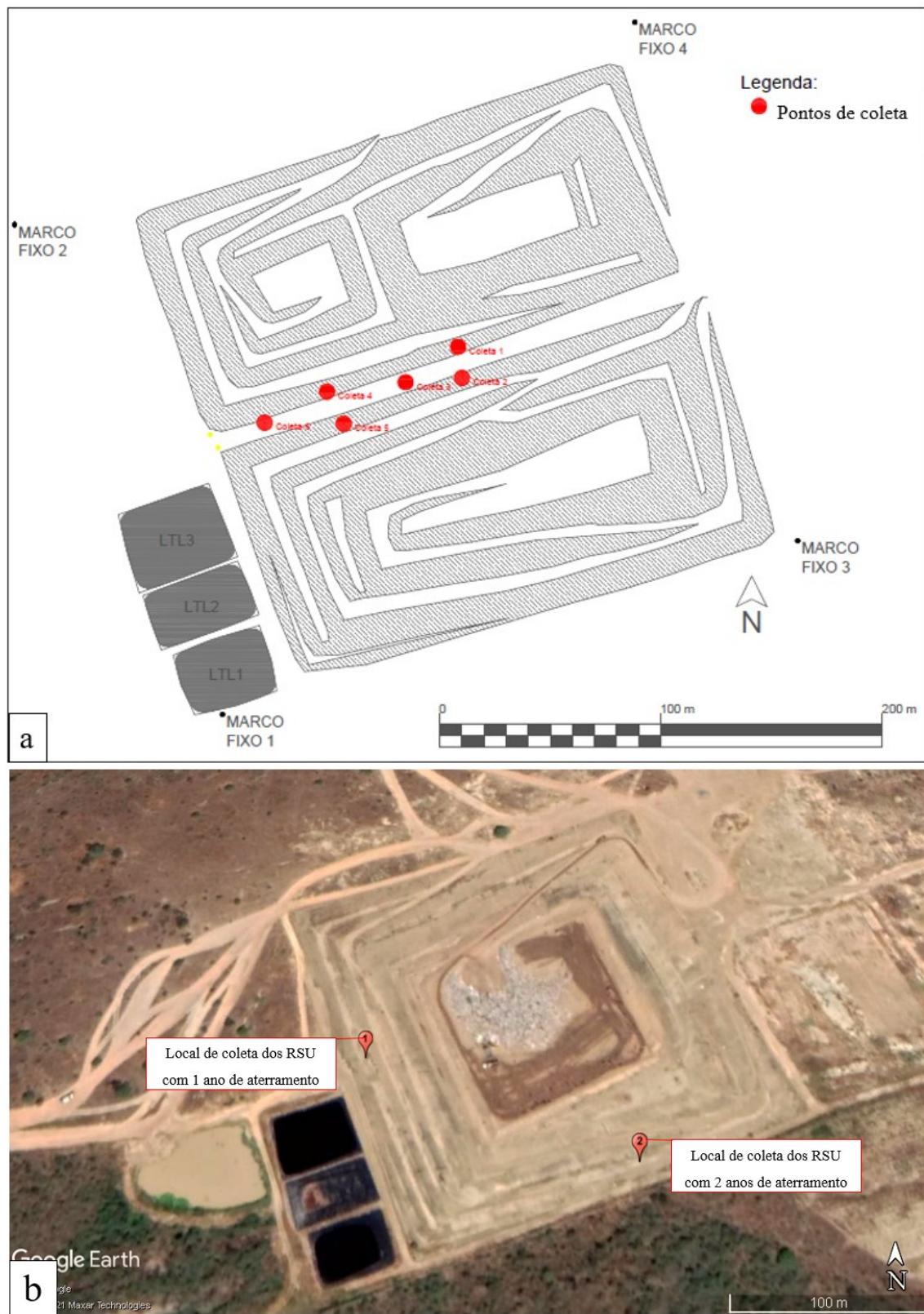


Figura 1 – Locais de coleta dos resíduos recém aterrados (a); e com 1 e 2 anos de aterrramento (b).
Fonte: Autores (2022).

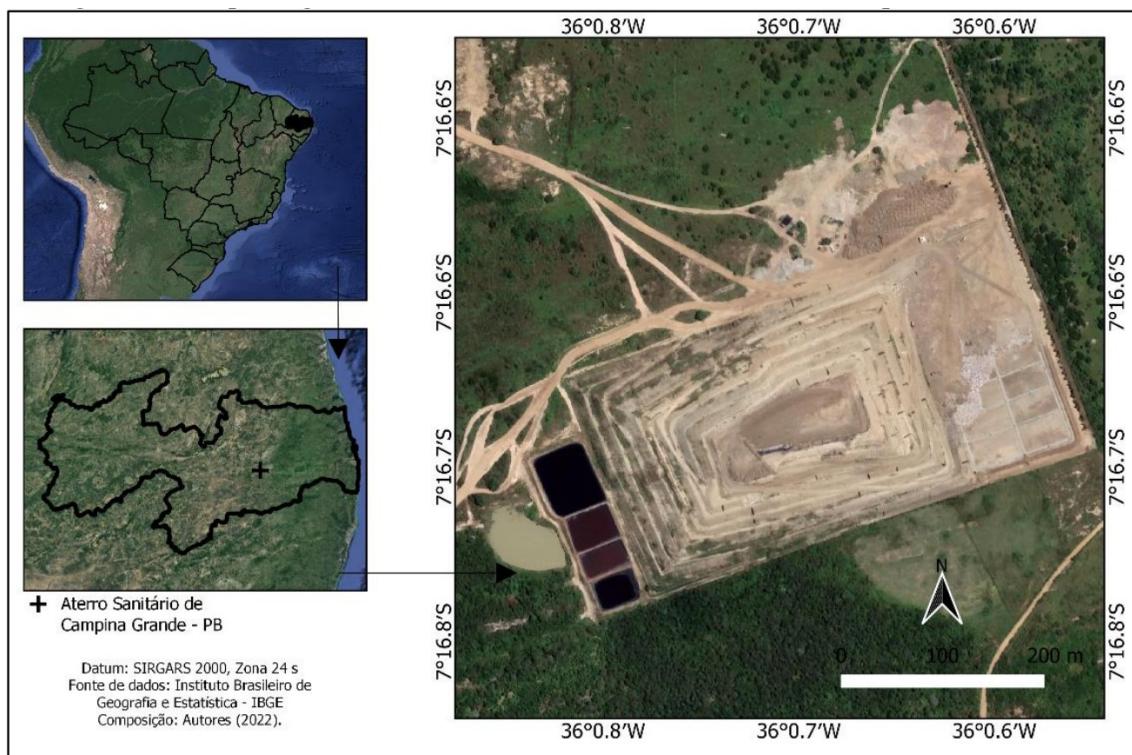


Figura 2 – Mapa de georreferenciamento do ASCG.
Fonte: Bezerra (2023).

2.2 Resistência ao cisalhamento dos resíduos

Os ensaios de resistência ao cisalhamento dos resíduos foram realizados na condição saturada e não saturada, com o objetivo de verificar as alterações dos parâmetros de resistência (intercepto coesivo e ângulo de atrito) dos RSU conforme sua idade de aterramento, umidade, peso específico e tensão normal aplicada. Como não existe nenhuma metodologia específica para o ensaio de cisalhamento direto com RSU, foi utilizada a metodologia da mecânica dos solos, baseada no critério de ruptura de Mohr-Coulomb e na D3080 (ASTM, 2011), procedimento este já adotado por Gabr e Valero (1995), Abreu e Vilar (2017), Pulat e Yukselen-Aksøy (2017), Singh e Uchimura (2023) e Norberto *et al.* (2024) para análise de resistência ao cisalhamento dos RSU.

Para realização dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto elaborou-se um planejamento fatorial com dois níveis, três fatores e três repetições de ponto central para abranger diferentes cenários que os resíduos podem estar submetidos no aterro sanitário. Estas configurações foram adotadas para as amostras de resíduos recém dispostos no ASCG, assim como para aquelas que possuíam 1 e 2 anos de aterramento.

Na Tabela 1 é possível verificar as variáveis independentes adotadas. A tensão cisalhante é obtida como variável resposta, sendo que a variabilidade do peso específico, teor de umidade e tensão normal influenciam na resposta da resistência ao cisalhamento dos resíduos aterrados em diferentes idades.

Tabela 1 – Matriz do delineamento fatorial para análise da resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos aterrados em diferentes idades.

Variáveis	Nível		
	-1	0	+1
Peso específico (kN/m ³)	10	12,5	15
Teor de umidade (%)	34	49,5	65
Tensão normal (kPa)	50	175	300

Fonte: Autores (2022).

Os níveis determinados para peso específico foram baseados em valores típicos para RSU verificados na literatura. Conforme levantamento bibliográfico realizado por Ramaiah, Ramana e Datta (2017), há uma variação desse parâmetro, porém os valores comumente encontrados estão entre 10 e 15 kN/m³. Por isso, a amplitude peso específico adotado neste estudo variou de 10 a 15 kN/m³. Já os limites estabelecidos para tensão normal aplicada na amostra de resíduos compreenderam uma faixa de 50 a 300 kPa. Tensões equivalentes a 5 m e 30 m de altura do maciço sanitário, considerando um peso específico de 10 kN/m³, que,

segundo Zekkos *et al.* (2006) e Boscov (2008), corresponde ao valor médio da massa específica aparente para resíduos coletados na superfície.

A variabilidade do teor umidade dos resíduos dos níveis -1 (34%) a +1 (65%) foi determinada de acordo com os estudos realizados por Ribeiro (2012), que investigou a umidade de um aterro experimental de resíduos sólidos urbanos na cidade de Campina Grande – PB e constatou uma umidade máxima de 65% e mínima de 34% em um período que abrangeu a época seca e de chuvas da região geografia do Aterro Sanitário em estudo. Vale ressaltar que o município de Campina Grande é o principal contribuinte na disposição de resíduos no Aterro Sanitário em estudo.

No planejamento fatorial para realização do ensaio de cisalhamento direto foi utilizado o Delineamento Composto Central (DCC) com 2 níveis, 3 fatores e 3 pontos centrais. A análise de resistência ao cisalhamento dos resíduos aterrados foi realizada na condição saturada e não-saturada, utilizando os mesmos níveis e fatores apresentados na Tabela 2. Foram realizados 22 ensaios de cisalhamento direto (11 na condição saturada e 11 na condição não saturada) para cada idade dos resíduos (0, 1 e 2 anos), totalizando 66 ensaios.

Tabela 2 – Matriz do planejamento fatorial para análise da resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos aterrados em diferentes idades.

Experimentos	Peso específico (kN/m ³)	Teor de umidade (%)	Tensão normal (kPa)
1	10	34	50
2	15	34	50
3	10	65	50
4	15	65	50
5	10	34	300
6	15	34	300
7	10	65	300
8	15	65	300
9 (C*)	12,5	49,5	175
10 (C*)	12,5	49,5	175
11 (C*)	12,5	49,5	175

C*: ponto central.

Fonte: Autores (2022).

2.3 Modelagem estatística dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos

Na busca de estabelecer um modelo que descreva a relação das variáveis investigadas com a tensão cisalhante, procedeu-se com a regressão linear múltipla, Equação (1), para cada configuração ou cenário em que os resíduos estivessem submetidos. Dessa forma, foi possível determinar a tensão cisalhante e consequentemente os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos aterrados em diferentes idades.

$$\tau = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots + b_k x_k \quad (1)$$

Sendo:

τ = Tensão cisalhante;

a = Coeficiente angular da i -ésima variável;

S = Número de variáveis independentes;

b_1 = coeficiente de regressão associado à primeira variável preditora x_1 ;

b_2 = coeficiente de regressão associado à segunda variável preditora x_2 ;

b_3 = coeficiente de regressão associado à terceira variável preditora x_3 ;

b_k = coeficiente de regressão associado à variável preditora x_k .

Para avaliar a significância do modelo e o efeito dos fatores na variável resposta, construiu-se o gráfico de Pareto e realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA). Após a verificação da significância de cada fator na variável resposta (tensão cisalhante), procedeu-se com a descrição gráfica do modelo ajustado (superfície resposta e/ou curvas de contorno). O diagnóstico sobre a qualidade de ajuste dos modelos aos dados foi realizado com base no coeficiente de determinação (R^2) e análise dos resíduos estatísticos.

A significância e validação dos coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla foram verificadas por meio da análise dos coeficientes de regressão. Para avaliar a adequabilidade do ajuste realizado, verificou-se as hipóteses de normalidade e variância constante (homoscedasticidade) dos resíduos são satisfeitas. Essas análises foram realizadas por meio dos gráficos normal probabilístico (resíduos versus

valores preditos) e dos valores observados versus valores preditos. Com os gráficos dos valores observados versus valores preditos pôde-se também verificar a linearidade dos modelos obtidos. Se essa relação não for linear, o modelo de regressão linear pode não ser adequado, e outros modelos, como modelos não-lineares ou modelos com variáveis transformadas, podem ser mais apropriados.

3. Resultados e discussão

A Tabela 3 apresenta a estatística descritiva dos resultados obtidos, por meio do planejamento fatorial, para determinação da tensão cisalhante dos resíduos aterrados.

Tabela 3 – Estatísticas descritivas da resistência ao cisalhamento dos resíduos aterrados.

Idade de aterramento	Recém aterrado		1 ano		2 anos	
Condição de saturação	NSAT	SAT	NSAT	SAT	NSAT	SAT
Tamanho amostral (kPa)	11	11	11	11	11	11
Média (kPa)	108	78	133	123	116	96
Mediana (kPa)	112	79	137	127	106	101
Desvio padrão (kPa)	65,3	49	71	65	68	56
Coeficiente de variação	60%	62%	53%	52%	59%	58%
Valor máximo (kPa)	219	175	251	205	226	191
Valor mínimo (kPa)	18	29	34	27	12	21
Amplitude (kPa)	201	146	217	178	214	170

NSAT: Não saturado; SAT: Saturado.

Fonte: Autores (2022).

Conforme Tabela 3, os valores da tensão cisalhante apresentaram amplitudes que variaram de 146 a 217 kPa. Para todas as condições investigadas, os coeficientes de variação foram superiores a 50%. Esses resultados constatam a elevada variabilidade da tensão cisalhante que os materiais confinados possuem, mesmo quando analisado esses resíduos com a mesma composição e idade de aterramento. Embora, como já dito, a composição e a idade de aterramento desses resíduos sejam semelhantes, há a possibilidade de uma variação no arranjo molecular tridimensional da estrutura que compõe esses RSU, que não só pode variar com o tempo, mas também devido aos processos físico-químicos e biológicos dos resíduos, o que influencia nos esforços a essas tensões cisalhantes, assim, demonstrando uma provável causa desses valores discrepantes.

Outras variáveis, como tensão normal, peso específico e umidade de moldagem também são fatores que influenciam na variabilidade da tensão cisalhante dos resíduos. Destaca-se que não é indicado a utilização dos valores de medida central quando as características dos resíduos são desconhecidas. Reddy *et. al.* (2011), Reddy *et. al.* (2009) e Kavazanjian (2001) também constatam a elevada amplitude desse parâmetro. Por isso, a necessidade de investigar os possíveis fatores que interferem na resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolver modelos que forneçam respostas mais precisas.

A Tabela 4 apresenta, por meio da análise de variância (ANOVA) realizada para os resultados dos planejamentos fatoriais dos resíduos, os coeficientes de determinação (R^2) dos modelos, para um nível de significância de 5%, para todas as idades analisadas nas condições saturada e não saturada.

Tabela 4 – Valores de R^2 para os modelos gerados dos resíduos.

Idade de aterramento	R^2	
	NSAT	SAT
Recém aterrado	0,997	0,908
1 ano de aterramento	0,997	0,995
2 anos de aterramento	0,988	0,983

Fonte: Autores (2025).

Ao observar a Tabela 4, nota-se que mais de 90% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado. Essa afirmação é válida para todas as idades de RSU, assim como para ambas as condições estudadas. Demonstrando assim, que o modelo gerado consegue compreender bem as características dos resíduos analisados, sob as condições propostas, trazendo bons resultados.

As envoltórias de ruptura foram obtidas a partir das Equações (2), (3), (4), (5), (6) e (7) que descrevem os modelos resultantes do planejamento fatorial para cada cenário investigado.

$$\tau = -154,28 + 0,47 * \sigma + 16,59 * \gamma + 2,12 * w + 0,01 * \sigma * \gamma - 0,24 * \gamma * w \quad (2)$$

$$\tau = -80,80 + 0,45 * \sigma + 5,97 * \gamma + 1,93 * w + 0,018 * \sigma * \gamma - 0,006 * \sigma * w - 0,13 * \gamma \quad (3)$$

$$\tau = -90,13 + 0,59 * \sigma + 7,95 * \gamma + 0,67 * w + 0,017 * \sigma * \gamma - 0,0042 * \sigma * w - 0,021 * \gamma \quad (4)$$

$$\tau = -73,66 + 0,86 * \sigma + 8,98 * \gamma + 0,49 * w + 0,023 * \sigma * \gamma - 0,0002 * \sigma * w - 0,017 * \gamma \quad (5)$$

$$\tau = -239,12 + 0,73 * \sigma + 19,70 * \gamma + 3,13 * w - 0,003 * \sigma * w - 0,24 * \gamma * w \quad (6)$$

$$\tau = 46,42 + 0,33 * \sigma - 0,96 * \gamma + 1,39 * w + 0,025 * \sigma * \gamma - 0,0041 * \sigma * w - 0,086 * \gamma \quad (7)$$

Sendo:

τ = tensão cisalhante (kPa);

σ = tensão normal (kPa);

γ = peso específico (kN/m³);

w = umidade de moldagem (%).

A tabela 5 apresenta um resumo do cenário correspondente a cada Equação.

Tabela 5 – Equações das envoltórias de ruptura.

Equação	Cenário
Equação (2)	Resíduos recém aterrados na condição não saturada
Equação (3)	Resíduos recém aterrados na condição saturada
Equação (4)	Resíduos com 1 ano de idade na condição não saturada
Equação (5)	Resíduos com 1 ano de idade na condição saturada
Equação (6)	Resíduos com 2 anos de idade na condição não saturada
Equação (7)	Resíduos com 2 anos de idade na condição saturada

Fonte: Autores (2022).

A análise dos resíduos estatísticos foi realizada por meio do gráfico da probabilidade normal, Figura 3. É possível observar que os resíduos obedecem à distribuição normal, no qual não há pontos muito distantes da reta que indica a normalidade. Dessa forma, não há evidências de ausência de normalidade dos resíduos.

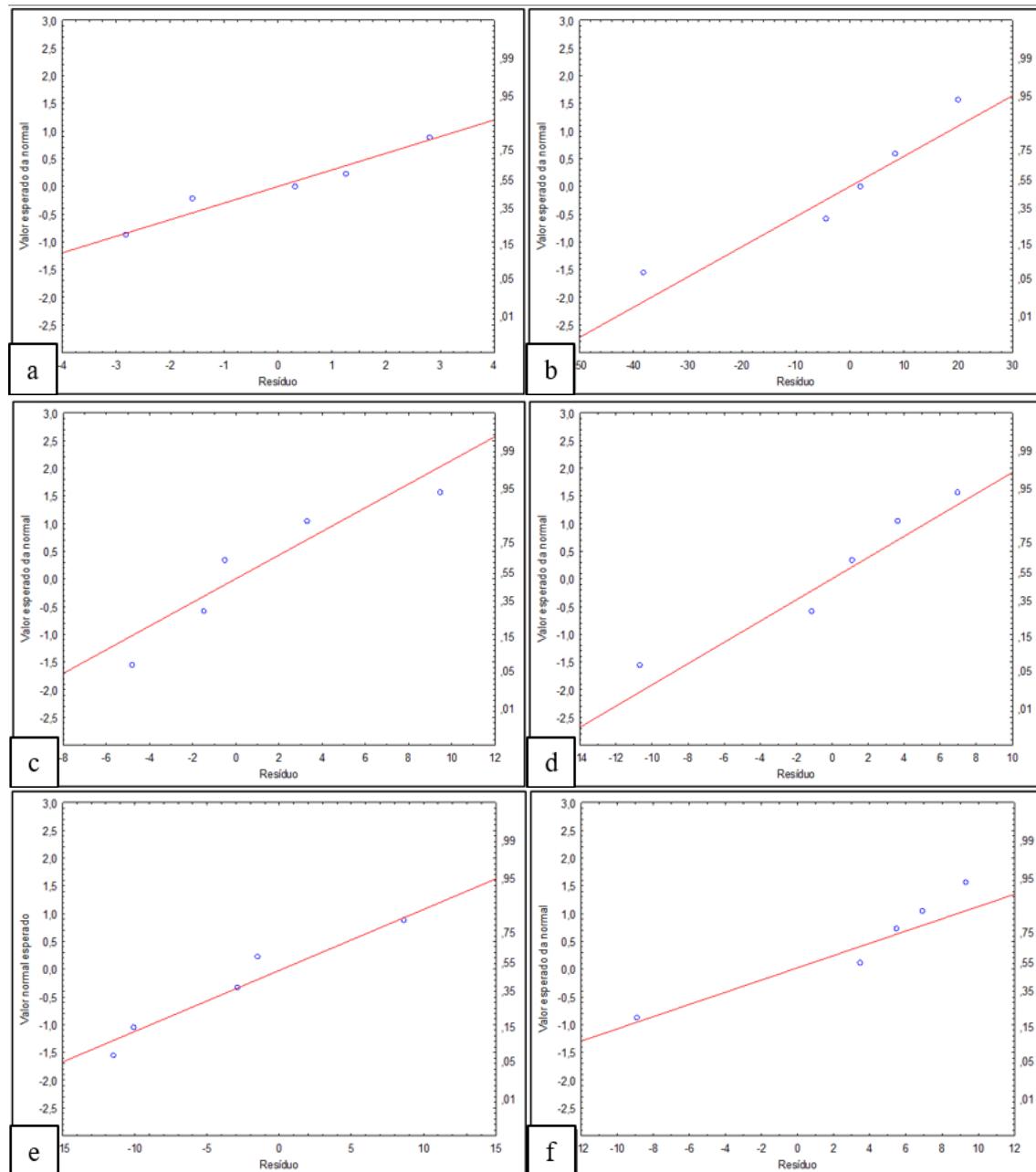


Figura 3 – Gráfico da probabilidade normal dos resíduos dos modelos para previsão da tensão cisalhante na condição não saturada dos resíduos sólidos urbanos com 0 (a), 1 (c) e 2 (e) anos de idade e na condição saturada dos resíduos com 0 (b), 1 (d) e 2 (f) anos de idade.

Fonte: Autores (2022).

A Figura 4 descreve os valores observados experimentalmente e os valores previstos pelos modelos associados à resposta tensão cisalhante nos RSU. Observa-se uma boa concordância entre eles, como era de se esperar com base nos resultados das análises de variância. De forma geral, todos os modelos apresentam um bom ajuste e podem ser utilizados para determinação da tensão cisalhante dos resíduos sólidos urbanos.

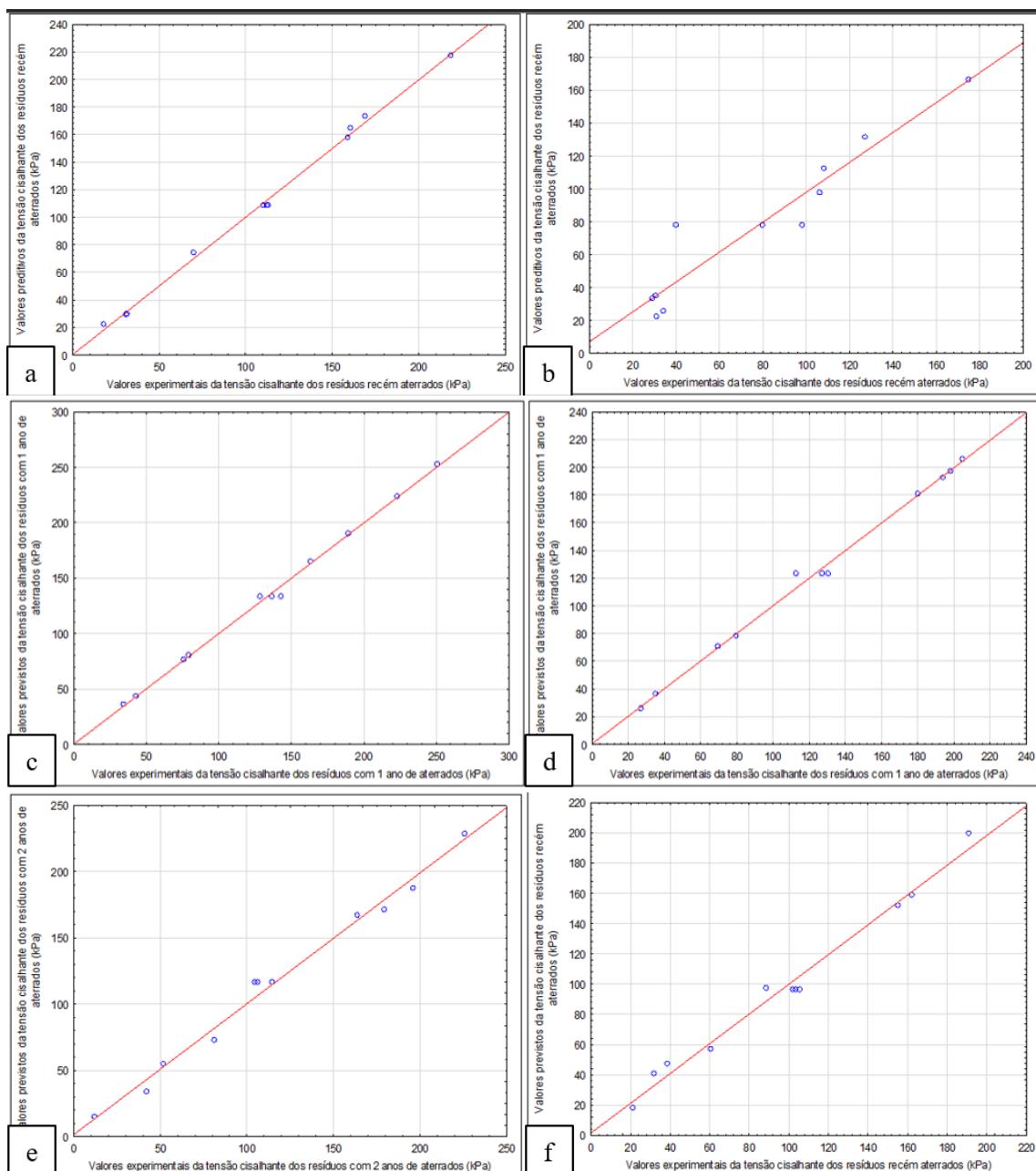


Figura 4 – Valores experimentais versus valores previstos pelos modelos de predição da tensão cisalhante na condição não saturada dos resíduos sólidos urbanos com 0 (a), 1 (c) e 2 (e) anos de idade e na condição saturada dos resíduos com 0 (b), 1 (c) e 2 (f) anos de idade.

Fonte: Autores (2022).

Dessa forma, as tensões cisalhantes dos RSU foram determinadas por meio das Equações (2), (3), (4), (5), (6) e (7). Sendo possível, também, a determinação dos interceptos coesivos e ângulos de atrito dos resíduos. A partir dessas equações foram obtidas envoltórias de rupturas dos RSU com 0, 1 e 2 anos de aterrados (Tensão cisalhante (kPa) x Tensão normal (kPa)), para condições de contorno estabelecidas no planejamento fatorial, na condição saturada e não saturada (Figura 5).

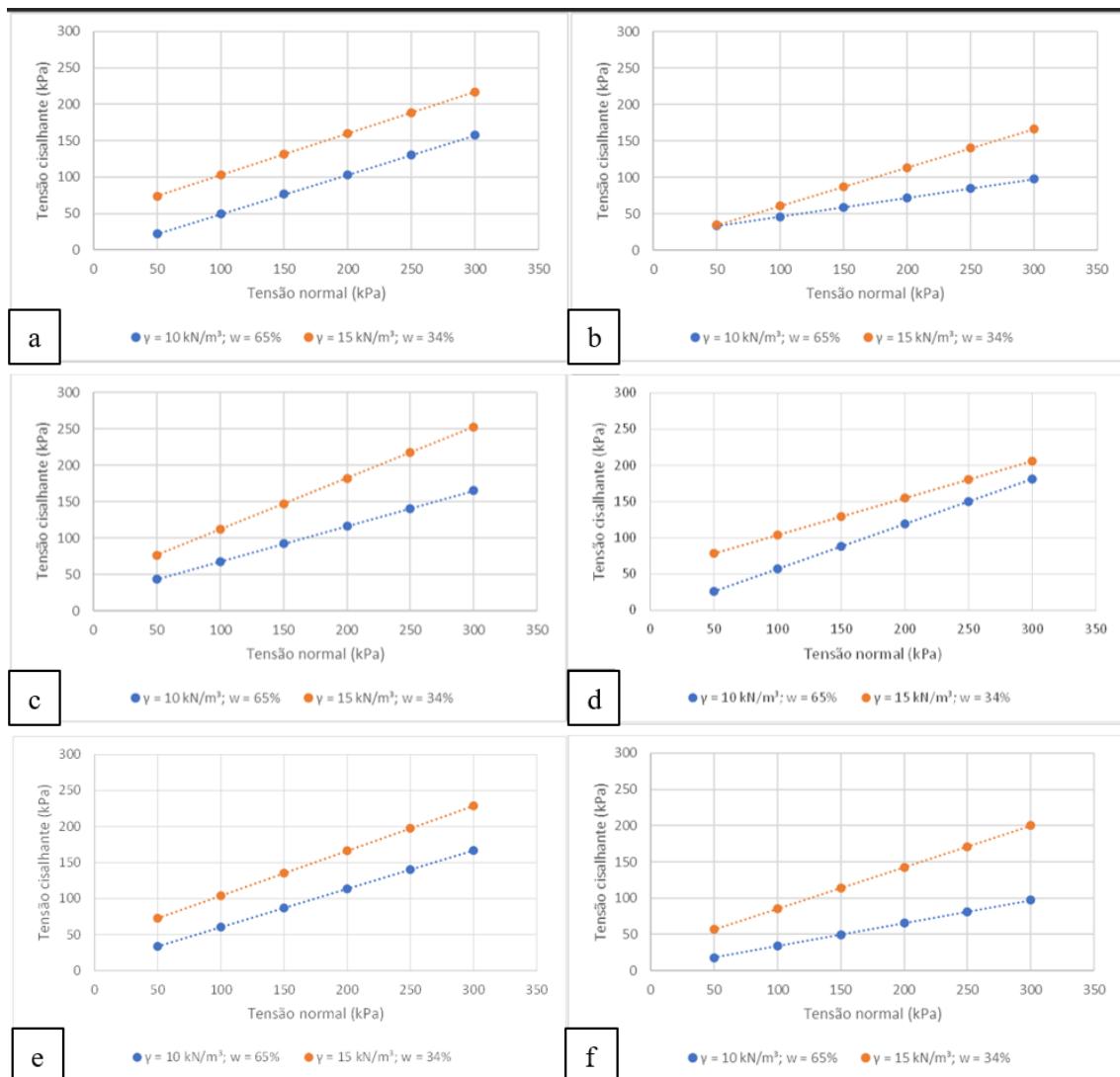


Figura 5 – Envoltórias de ruptura dos resíduos sólidos urbanos com 0 (a), 1 (c) e 2 (e) anos de idade na condição não saturada e com 0 (b), 1 (d) e 2 (f) anos de idade na condição saturada.

Fonte: Autores (2022).

Verifica-se na Figura 5 que a inundação dos corpos de prova diminuiu as tensões cisalhantes das amostras, reduzindo, portanto, a influência que o peso específico exerce na resistência ao cisalhamento. Amostras de RSU inundadas, normalmente, sofrem uma diminuição na capacidade de suas partículas estarem próximas entre si e ocasiona o amolecimento de partículas orgânicas, influenciando assim o peso específico, e o quanto esse parâmetro pode ser efetivo na resistência ao cisalhamento.

Nos RSU, o peso específico influencia a mobilização de atrito interno e a eficácia das forças coesivas aparentes, especialmente em materiais onde a estrutura tridimensional dos resíduos desempenha papel determinante (Bareither *et al.*, 2012; Gulnihal *et al.*, 2021). Fisicamente, em amostras mais densas, há maior entrelaçamento de fibras, sobreposição de camadas plásticas e incremento no número de contatos interparticulares, o que resulta em maior resistência ao cisalhamento (Alemayehu *et al.*, 2024).

Quanto à umidade, seu efeito sobre a resistência é mais complexo. Em condição não saturada, a água adsorvida nos poros promove sucção capilar, o que pode contribuir para o aumento da coesão. Contudo, com o incremento da umidade até a saturação, o efeito coesivo desaparece, e o líquido atua como lubrificante, reduzindo os esforços de atrito interno e promovendo rearranjos estruturais que contribuem para a redução da resistência ao cisalhamento (Chen *et al.*, 2023).

Na Tabela 6 é possível observar os parâmetros de resistência ao cisalhamento das envoltórias de ruptura apresentados na Figura 5.

Tabela 6 – Parâmetros de resistência.

Condição do ensaio	Idade dos resíduos (ano)	Peso específico (kN/m ³)	Umidade (%)	Ângulo de atrito - ϕ (°)	Coesão - c (kPa)
Não saturado	0	10	65	28,4	0
		15	34	29,7	45,4
	1	10	65	25,9	19,1
		15	34	35,2	41
	2	10	65	28,0	7,0
		15	34	31,9	41,6
Saturado	0	10	65	14,4	20,6
		15	34	27,7	8,6
	1	10	65	31,8	0
		15	34	27,0	52,9
	2	10	65	17,6	2,0
		15	34	29,7	28,4

Fonte: Autores (2022).

O ângulo de atrito apresentou pouca ou nenhuma variação para os resíduos com menor peso específico (10 kPa) e maior umidade (65%) nas três idades de aterramento (0, 1 e 2) na condição não saturada. Para esta configuração, a coesão aumentou de 0 kPa para 19,1 kPa, quando comparado os resíduos com 0 e 1 ano de aterramento e de 0 kPa para 7 kPa, quando comparados os resíduos com 0 e 2 anos de aterrados. Nas amostras com maior peso específico e menor umidade, verifica-se um aumento do ângulo de atrito e uma redução da coesão, quando analisada a condição não saturada. Para condição saturada, verifica-se um aumento do ângulo de atrito e da coesão, conforme envelhecimento dos resíduos.

Os menores valores de resistência ao cisalhamento foram verificados nas amostras em que a condição é saturada. Isso pode ser atribuído à redução do efeito da sucção e, consequente, a queda na resistência ao cisalhamento causada pelo aumento nas pressões de água nos poros. O efeito da sucção é um assunto de extrema dificuldade para ser abordado, pois não há definições a respeito de seu comportamento (Araujo, 2024; Silva, 2024). Grande maioria das análises e considerações feitas para os RSU tem como base os estudos já realizados para solos, contudo, o fator de sucção e, por consequência, o estudo de solos não saturados ainda não obteve uma conclusão final. Considerando que os resíduos apresentam características e propriedades, normalmente, mais complexas que solos, o efeito da sucção nos RSU ainda se encontra em fases iniciais de estudo. Porém, ao analisar o comportamento dos RSU sob a presença de líquidos, pode-se confirmar que, a condição saturada é a mais crítica, trazendo os menores valores de resistência ao cisalhamento.

Ao analisar as mudanças que ocorrem com os resíduos levando em conta os tempos de aterramento, observa-se que o envelhecimento dos RSU ocasionou aumento da resistência ao cisalhamento como um todo. Os valores observados de ângulo de atrito e coesão nesta pesquisa estão de acordo com outros valores encontrados na literatura técnica, que apresentaram condições de testes similares ao desta pesquisa, como os de Gabr e Valero (1995), Reddy *et al.* (2009), Reddy *et al.* (2011), Shariatmadari *et al.* (2014), Reddy *et al.* (2015) e Pulat e Yukselen Aksoy (2017), indicando que é possível uma identificação inicial do padrão comportamental dos RSU, levando em conta que a variação de tempo de aterramento analisada é de apenas dois anos, sendo necessário uma abrangência maior de idades para uma melhor definição de comportamento dos resíduos.

Na literatura brasileira, uma ampla gama de valores é observada, tanto para a coesão quanto para o ângulo de atrito de resíduos (Abreu e Vilar, 2017; Jucá *et al.*, 2021; Bahia *et al.*, 2024; Norberto *et al.*,

2024). Essa variabilidade é, provavelmente, influenciada por vários fatores, incluindo variações no teor de umidade, climas diversos e diferentes métodos de operação de aterros (Bareither *et al.*, 2020; Akbari *et al.*, 2022; Dehdari *et al.*, 2022). Além disso, as distintas composições gravimétricas dos aterros exercem um impacto significativo na variabilidade dos valores de coesão e ângulo de atrito (Bahia *et al.* 2024).

4. Conclusões

- Todos os modelos obtidos no planejamento fatorial apresentaram um bom ajuste e são capazes de prever a tensão cisalhante dos RSU com idades, umidades e tensões normais sob condição saturada ou não saturada dentro dos limites que foram gerados.
- A resistência ao cisalhamento de amostras de RSU aumenta com o aumento da tensão normal devido ao aumento no contato entre as partículas de RSU.
- A resistência ao cisalhamento dos RSU é melhorada com o envelhecimento, uma vez que os componentes orgânicos do RSU se degradam e a proporção de componentes fibrosos aumentam, o que leva a um maior aumento da resistência ao cisalhamento.
- A saturação dos resíduos reduz a resistência ao cisalhamento e a variação da umidade dos resíduos, até 64%, não compromete a resistência ao cisalhamento.
- Os modelos desenvolvidos possibilitam a análise e dimensionamento geotécnico de aterros sanitários, a predição de estabilidade de taludes e avaliação de risco de colapso estrutural, especialmente em cenários onde métodos diretos (ensaios laboratoriais e de campo) são economicamente inviáveis.
- A faixa temporal avaliada (0 a 2 anos de aterramento) restringe a generalização dos resultados para resíduos com tempos mais avançados de decomposição. Diante disso, propõem-se investigações adicionais voltadas à ampliação da base de dados, com inclusão de RSU de diferentes origens geográficas e períodos mais longos de decomposição.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro. À Ecosolo Gestão Ambiental de Resíduos Ltda pelo suporte contínuo para o desenvolvimento das análises de campo e apoio financeiro.

Referências

- ABREU, A. E. S.; VILAR, O. M. Influence of composition and degradation on the shear strength of municipal solid waste. *Waste Management*, [s. l.], v. 68, p.263-274, 7 jun. 2017.
- AKBARI I, AJDARI M, SHAFEE A. Mechanical properties of landfill components under low to medium stress levels. *Eng Geol Environ* 81(9):368. 2022.
- ALEMAYEHU, A. B.; YENENEH, M. G.; MUHAMMED, A. A. Mechanical properties of municipal solid waste in tropical landfills. *Waste Management*, v. 173, p. 1–13, 2024.
- ALIDOUST, P. et al. Prediction of the shear modulus of municipal solid waste (MSW): An application of machine learning techniques. *Journal of Cleaner Production*, v. 303, p. 127053, 2021.
- ALIDOUST, P.; KERAMATI, M.; SHARIATMADARI, N. Laboratory studies on effect of fiber content on dynamic characteristics of municipal solid waste. *Waste Management*, v. 76, p. 126-137, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D3080: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.
- ANDRADES, S. A. de. *Estudo do fator de segurança de um aterro sanitário tipo convencional comparando com um aterro sanitário tipo encosta*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2018.
- ARAUJO, P. S. *Fluxo de água e gás em camada de cobertura final de solo compactado em Aterro Sanitário*. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, [S. l.], 2024.
- AYUBA, K. A.; MANAF, L. A.; SABRINA, A. H.; AZMIN, S. W. N. Current Status of Municipal Solid Waste Management Practise in FCT Abuja. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, [s. l.], v. 5, n. 6, p. 295-304, 20 jun. 2013.

- BAHIA, V. E. A. G. et al. Influence of municipal solid waste composition on the shear strength of a landfill cell. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20 nov. 2024.
- BAREITHER, C. A. et al. Hydraulic and mechanical behavior of municipal solid waste and high-moisture waste mixtures. *Waste Management*, v. 105, p. 540–549, mar. 2020.
- BAREITHER, C. A.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. Effects of waste composition and decomposition on the shear strength of municipal solid waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 138, n. 10, p. 1161-1174, 2012.
- BOSCOV, M. E. G. *Geotecnia ambiental*. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248p.
- CHEN D, CHEN YG, DENG YF, YE DC, YE WM, WANG Q. Mechanical properties of municipal solid waste under different stress paths: effects of plastic content and particle gradation. *Waste Manag* 185:43–54. 2024.
- CHETRI JK, REDDY KR. Advancements in municipal solid waste landfill cover system: a review. *J Indian Inst Sci*. 101(4):557–588. 2021.
- DEHDARI V, AJDARI M, ROSTAMI A. Experimental study on shear strength parameters of municipal solid waste employing a large direct shear apparatus. *Geomech Geoeng* 17(4):1184–1199. 2022.
- DIXON, N.; JONES, D. R. V. Engineering properties of municipal solid waste. *Geotextiles and Geomembranes*, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 205-233, 24 fev. 2005.
- FARIA, F. dos S.. *Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos Urbanos*. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- FEI X, HE H, PI X, LU X, CHEN Q, MA J, WANG Y, FANG M, WU C, FENG S. The distribution, behavior, and release of macro and micro-size plastic wastes in solid waste disposal sites. *Crit Rev Environ Sci Technol* 53(3):366–389. 2023.
- GABR, M.; VALERO, S. Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste. *Geotechnical Testing Journal*, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 241-251, 1995.
- GULNIHAL O, MORGAN J, MOHANA G, SHEHU I, TAHERA A. Design and Operation of effective landfills with minimal effects on the environment and human health. *J Environ Public Health* 692160: 1–13. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6921607>
- HANSON, J. L.; YESILLER, N.; STOCKHAUSEN, S. A. V.; WONG, W. W. Compaction characteristics of municipal solid waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, [s. l.], v. 136, n. 8, p. 1095-1102, ago. 2010.
- HETTIARACHCHI, C. H.; MEEGODA, J. N.; TAVANTZIS, J.; HETTIARATCHI, P. Numerical model to predict settlements coupled with landfill gas pressure in bioreactor landfills. *Journal of Hazardous Materials*, [s. l.], v. 139, n. 3, p. 514-522, 31 jan. 2007.
- HUSSEIN M, YONEDA K, MOHD-ZAKI Z, AMIR A, OTHMAN N. Heavy metals in leachate, impacted soils and natural soils of different landfills in Malaysia: an alarming threat. *Chemosphere* 267:128874. 2021.
- JUCÁ J.F.T., NORBERTO A.D.S., SANTOS J.I.D., MARINHO F.A. Brasília municipal solid waste landfill: a case study on flow and slope stability. *Soils Rocks*. 2021
- KARIMPOUR-FARD M, ALAIE R, REZAEI SOUF G, MACHADO SL, REZAEI FOUMANI E, REZAEI MASOULEH MOGHADAM R. Laboratory study on dynamic properties of municipal solid waste in Saravan Landfill, Iran. *Int J Civ Eng* 19:861–879. 2021
- KAVAZANJIAN, E. Mechanical Properties of Municipal Solid Waste. In: *International Landfill Symposium*, 8., 2001, Margherita di Pula, Cagliari, Italy. Anais [...]. Cagliari: CISA, 2001, v. 3, p. 415-424.
- KHALEGHI M, HESHMATI AAR, KARIMPOUR-FARD M, MACHADO SL. Thermal effects on the compressibility and permeability of municipal solid waste landfills. *Int J Environ Sci Technol* 21(1):73–90. 2024

- LANDVA, A. O.; CLARK, J. I. Geotechnical testing of waste fill. In: *Canadian Geotechnical Conference*, 39., 1986, Ottawa, Ontario. Anais [...]. Ottawa: 1986.
- LINDAMULLA L, NANAYAKKARA N, OTHMAN M, JINADASA S, HERATH G, JEGATHEESAN V. Municipal solid waste landfill leachate characteristics and their treatment options in tropical countries. *Curr Pollut Rep.* 8(3):273–287. 2022.
- LOUREIRO, S. M.. *Índice de qualidade no sistema da gestão ambiental em aterros de resíduos sólidos urbanos - IQS*. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- MARTINS, H. L.. *Avaliação da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por Meio de Ensaios de Cisalhamento Direto em Equipamento de Grandes Dimensões*. 2006. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- MORITA AK, IBELLI-BIANCO C, ANACHE JA, COUTINHO JV, PELINSON NS, NOBREGA J, ROSALEM LMP, LEITE CMC, NIVIADONSKI LM, MANASTELLA C, WENDLAND E. Pollution threat to water and soil quality by dumpsites and non-sanitary landfills in Brazil: a review. *Waste Manag.* 131:163–176. 2021.
- NORBERTO ADS, MEDEIROS RDM, CORRÊA CL, MARIANO MOH, JUCÁ JFT. Laboratory tests for evaluation of shear strength and tensile effect generated by fibers present in Muribeca's landfills of municipal solid waste. *Soils Rocks.* 47(1):e2024008622. 2024.
- NORBERTO, A. S., CORRÊA, C. L., MARIANO, M. O. H., JUCÁ, J. F. T. (2020). Análise estatística da variabilidade de parâmetros de resistência ao cisalhamento de aterros sanitários. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 5(1), 108-116.
- OSRA FA, OZCAN HK, ALZAHHRANI JS, ALSOUF MS. Municipal solid waste characterization and landfill gas generation in Kakia landfill, Makkah. *Sustainability*. 13(3):1462. 2021.
- PULAT, H. F.; YUKSELEN-AKSOY, Y. Compressibility and shear strength behaviour of fresh and aged municipal solid wastes. *Environmental Geotechnics*, p. 1–9, 9 maio 2019.
- PULAT, H. F.; YUKSELEN-AKSOY, Y. Factors affecting the shear strength behavior of municipal solid wastes. *Waste management*, [s. l.], v. 69, p. 215-224, 2017.
- RAMAIAH, B. J.; RAMANA, G. V.; DATTA, Manoj. Mechanical characterization of municipal solid waste from two waste dumps at Delhi, India. *Waste Management*, [s. l.], v. 68, p. 275-291, 2017.
- REDDY, K. R., HETTIARACHCHI, H., GIRI, R. K., GANGATHULASI, J. Effects of degradation on geotechnical properties of municipal solid waste from Orchard Hills Landfill, USA. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v. 1, n. 3, p. 24, 2015.
- REDDY, K. R.; HETTIARACHCHI, H.; GANGATHULASI, J.; BOGNER, J. E. Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation. *Waste Management*, [s. l.], v. 31, n. 11, p. 2275-2286, nov. 2011.
- REDDY, K. R.; HETTIARACHCHI, H.; PARAKALLA, N. S.; GANGATHULASI, J.; BOGNER, J. E. Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA. *Waste Management*, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 952-959, fev. 2009.
- REMÉDIO, F. H.. *Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos sólidos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com o NSPT*. 2014. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2014.
- RICHARD, T.; TRAUTMANN, N.; KRASNY, M.; FREDENBURG, S.; STUART, C. The science and engineering of composting. *The Cornell composting website: Cornell University*. Disponível em: www.agrienarchive.ca/bioenergy/download/cornell_composting. Acesso em: 01/08/2019
- SHARIATMADARI, N.; ASADI, M.; KARIMPOUR-FARD, M. Investigation of fiber effect on the mechanical behavior of municipal solid waste by different shearing test apparatuses. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 14, n. 10, p. 2239–2248, 4 abr. 2017.

- SHARIATMADARI, N.; SADEGHPOUR, A. H.; RAZAGHIAN, F. Effects of aging on shear strength behavior of municipal solid waste. *Int J Civ Eng*, v. 12, n. 3, p. 226-237, 2014.
- SHENG, H., REN, Y., HUANG, M., ZHANG, Z., LAN, J. Vertical expansion stability of an existing landfill: A case study of a landfill in Xi'an, China. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 5574238. 2021.
- SILVA, T F. *Variações macro e microestruturais na permeabilidade ao lixiviado em camada de base de aterro sanitário pela interação solo-contaminante*. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, [S. l.], 2024.
- SINGH SK, CHOKHANDRE P, SALVE PS, RAJAK R. Open dumping site and health risks to proximate communities in Mumbai, India: a cross sectional case-comparison study. *Clin Epidemiol Glob Health* 9:34–4. 2021.
- SINGH V, UCHIMURA T. Effect of material composition on geotechnical properties—study on synthetic municipal solid waste. *Geotechnics* 3(2):397–415. 2023.
- STOLL, U. W. Mechanical Properties of Milled Domestic Trash. In: *National Water Resources Engineering Meeting*, 1971, Pheonix, AZ. Anais [...]. Pheonix: ASCE, 1971.
- VAVERKOVÁ MD, PALEOLOGOS EK, ADAMCOVÁ D, PODLASEK A, PASTERNAK G, ČERVENKOVÁ J, SKUTNIK Z, KODA E, WINKLER J. Municipal solid waste landfill: evidence of the efect of applied landfl management on vegetation composition. *Waste Manag Res*. 40(9):1402–1411. 2022.
- WANG, S. et al. Spatial variability characterization of clayey waste soils and its impact on probabilistic stability assessment of a landfill slope. *Acta Geotechnica*, 8 fev. 2024.
- XIE Y, XUE J, GNANENDRAN CT, XIE K. Geotechnical properties of fresh municipal solid wastes with difrent compositions under leachate exposure. *Waste Manag* 149:207–217. 2022.
- ZEKKOS, D., KAVAZANJIAN JR, E., BRAY, J. D., MATASOVIC, N., RIEMER, M. F. Physical characterization of municipal solid waste for geotechnical purposes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(9), 1231-1241. 2010.
- ZEKKOS, D.; BRAY, J.D.; KAVAZANJIAN JR., E.; MATASOVIC, N.; RATHJE, E.M.; RIEMER, M.F.; STOKOE, K.H. Unit weight of municipal solid waste. ASCE *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, [s. l.], v. 132, n. 10, p. 1250-1261. out. 2006.