



ISSN: 2525-815X

Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: www.jeap.ufrpe.br/

10.24221/jeap.5.1.2020.2840.108-116



Análise estatística da variabilidade de parâmetros de resistência ao cisalhamento de aterros sanitários

Statistical analysis of the variability of shear strength parameters of landfills

Alison de Souza Norberto^a, Christiane Lyra Corrêa^b, Maria Odete Holanda Mariano^c, José Fernando Thomé Jucá^d

^a Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Centro Acadêmico do Agreste. Av. Campina Grande, s/n, Km 59, Nova Caruaru, Caruaru-PE. CEP: 55014-900. E-mail: alison_norberto@hotmail.com.

ARTICLE INFO

Recebido Dia Mês Ano
Aceito Dia Mês Ano
Publicado Dia Mês Ano

ABSTRACT

Knowledge of the geotechnical parameters of urban solid waste directly influences the design of a sanitary landfill. The parameters of shear strength: specific weight, angle of friction and cohesion, condition the behavioral aspects of slope stability of urban solid waste landfill. The stability of a landfill depends on the resistance of elements, which have the most diverse characteristics, being the residues subject to the biodegradability process, which in turn causes a temporal variation of its parameters. Understanding the variability of these parameters, in view of their importance, is essential for engineering and environmental professionals, that plan, design, control and monitor such structures. Bringing statistical analyzes of the trends of these parameters is a tool of relevant usability for project estimates and analyzes of the mechanical behavior of the landfill. Considering this panorama, the present study statistically analyzed the variation of such parameters: specific weight, cohesion and angle of friction, through bibliographic compilation. The results show high dispersion values for the cohesion parameters and friction angle, with standard deviation values of 13.56 and 9.46, respectively.

Keywords: Urban solid waste, stability of slopes, geotechnical parameters.

RESUMO

O conhecimento dos parâmetros geotécnicos dos resíduos sólidos urbanos influencia de modo direto no projeto de um aterro sanitário. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento: peso específico, ângulo de atrito e coesão, condicionam os aspectos comportamentais da estabilidade de talude dos aterros de resíduos sólidos urbanos. A estabilidade de um aterro depende da resistência de seus elementos, que possuem as mais diversas características, estando os resíduos sujeitos ao processo de biodegradabilidade, que por sua vez causa uma variação temporal dos seus parâmetros. Compreender a variabilidade destes parâmetros, tendo em vista a sua importância, é essencial para os profissionais da engenharia e meio ambiente, o que planejam, projetam, controlam e monitoram tais estruturas. Trazer análises estatísticas das tendências destes parâmetros é uma ferramenta de relevante usabilidade para estimativas de projetos e análises do comportamento mecânico do aterro. Com esse panorama, o presente estudo analisou estatisticamente a variação dos parâmetros peso específico, coesão e ângulo de atrito, por meio de compilação bibliográfica. Os resultados mostram altos valores de dispersão para os parâmetros de coesão e ângulo de atrito, com valores de desvio padrão de 13,56 e 9,46, respectivamente.

Palavras-Chave: Resíduos sólidos urbanos, estabilidade de taludes, parâmetros geotécnicos.

Introdução

Sabe-se que com a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (2014) a destinação final dos Resíduos Sólidos Urbanos - RSU gerados deve ser o aterro sanitário, que até então se fundamenta nos métodos clássicos da mecânica dos solos, devido a falta de dados consistentes e de uma metodologia específica para a obtenção dos dados experimentais.

Os RSU dependem de diversos fatores como o clima, tempo, estações do ano, hábitos e o desenvolvimento socioeconômico da região em estudo. Cardim (2008) destaca que as diferentes condições de estocagem, exposição, profundidade de aterramento, drenagem, entre outros, dos RSU influenciam diretamente nas propriedades mecânicas dos resíduos sólidos.

As principais propriedades mecânicas dos RSU são diretamente influenciadas pela sua composição, bem como pelo comportamento de cada componente presente. Por se tratar de um material heterogêneo, torna-se difícil quantificar e qualificar suas propriedades, uma vez que cada componente trabalha de uma forma diferente devido as alterações sofridas por eles no decorrer do tempo, como características de biodegradação, formas e dimensões, fatos que dificultam a elaboração de amostras e realização de ensaios.

Quando analisa-se a composição e as condições das destinações finais dos RSU no Brasil, muitas apresentam alto teor de material biodegradável e deficiência ou mesmo inexistência de sistemas de drenagem interna. Estes fatores tendem a reduzir drasticamente os parâmetros de resistência da massa de resíduos, proporcionando muitas vezes a instabilidade do talude dos aterros sanitários/controlados, sendo seguida de ruptura.

Dentre os parâmetros de resistência têm-se os valores de peso específico, coesão e ângulo de atrito.

Segundo Boscov (2008), o peso específico dos resíduos sólidos urbanos é influenciado por diversos fatores, dentre os quais destacam-se a sua composição gravimétrica, a distribuição granulométrica, o grau de compactação, o grau de saturação, a idade do resíduo e a profundidade em que estiver aterrado.

Tanto a coesão como o ângulo de atrito sofrem variações temporais devido a diversos

fatores como: nível piezométrico do aterro, grau de compactação, morfologia e gravimetria.

Existem dois tipos de análises estatísticas: descritivas e conclusivas (inferencial). A análise descritiva apresenta dados sobre um segmento através de coletas e caracterização. Enquanto que a análise inferencial possibilita testes hipotéticos para chegar a conclusões sobre causas e efeitos entre os fatores analisados.

Isso posto, a análise estatística dos parâmetros de resistência dos aterros sanitários auxilia na compreensão da variabilidade das propriedades, permitindo a avaliação preliminar de como o aterro poderá se comportar no futuro, tendo como base um banco de dados coletados das literaturas existentes.

O objetivo deste estudo foi analisar estatisticamente a variabilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de aterros de resíduos sólidos, por meio de um agrupamento de dados reportados pela literatura técnica.

Material e Métodos

Parâmetros de resistência ao cisalhamento coletados da literatura

A partir da década de 1970 foram encontrados os primeiros estudos das análises dos parâmetros de resistência dos RSU facilmente encontrados na literatura. Parâmetros estes, obtidos através de ensaios de campo e de laboratório, com equipamentos de diferentes dimensões, e massa de resíduos de diferentes localidades, profundidade de aterramento e idade. Em razão da gama de variedades, os resultados dos parâmetros dos diversos pesquisadores apresentaram-se uma grande dispersão, dificultando a acurácia da análise estatística.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento coletados da literatura entre os anos de 1978 a 2018. Sendo esses, o peso específico, a coesão e o ângulo de atrito. Os dados apresentados incluem parâmetros obtidos com diferentes técnicas experimentais, como a testes de cisalhamento, testes de cisalhamento simples, retro análise, e em alguns casos, mesmo valores estimados.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos de aterros de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU de diversas literaturas. Fonte: Modificado de Strauss (1998), Silveira (2004), Borgatto (2010) e Remédio (2014).

γ (kN m ⁻³)	c (kPa)	ϕ (°)	Tipo de resíduo e/ou ensaio	Referência bibliográfica
-	40,5	13,2	Prova de carga <i>in-situ</i>	Converse, Davis & Dixon Associates (1975 em Gabr & Valero, 1995)
13	7	38	Resíduo municipal	Gay et al. (1978)

10	0	35	Resíduos municipais estimados por observação de campo	Cassina (1979)
9	10	16	Retro análise de deformações por cargas induzidas	Spillmann (1980)
11,5	7	42	Cisalhamento direto. Resíduos com 9 meses de decomposição	Gay et al. (1981)
9,5	28	26,5	Cisalhamento direto. Resíduos municipais novos	Gay et al. (1981)
-	37		Retro análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975)	Cooper & Clark (1982 em Gabr & Valero, 1995)
-	24	21,5	Valores recomendados de cálculo	Landva et al. (1984)
-	23	24	Cisalhamento direto. Resíduos novos	Landva et al. (1984)
-	16	38	Cisalhamento direto	Landva et al. (1984)
-	0	38	Cisalhamento direto drenado. 61,5 mm diâmetro X 25,4 mm espessura	LA Country Sanitation District (1984)
-	35	13,8	Retro análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975)	EMCON (1986 em Gabr & Valero, 1995)
-	34		Retro análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975)	Cooper Enginerrs (1986 em Gabr & Valero, 1995)
-	17	19,9	Retro análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975)	EMCON (1987 em Gabr & Valero, 1995)
7	-	-	Resíduos novos não decompostos e pouco compactados	Kaumoto & Cepolina, (1987)
11,5	-	-	Resíduos após a compactação	
-	27	19,6	Retro análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975)	Harding-Lawson & Assoc. (1987 em Gabr & Valero, 1995)
-	21	20	Retro análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975)	Dames & More (1988 em Gabr & Valero, 1995)
-	23,5	20,2	Retro análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975)	EMCON (1989 em Gabr & Valero, 1995)
-	15	33	Cisalhamento direto drenado. 419 mm X 287 mm	Landva & Clark (1990 em Gabr & Valero, 1995)
-	19	39	Cisalhamento direto drenado. 419 mm X 287 mm	Landva & Clark (1990 em Gabr & Valero, 1995)
-	12	35,2	Cisalhamento direto drenado. 419 mm X 287 mm	Landva & Clark (1990 em Gabr & Valero, 1995)
13	13,5	22	Resíduos sólidos antigos	Benvenuto & Cunha (1991)
15	10	30,5	Cisalhamento direto <i>in-situ</i>	Richardson & Reynolds (1991) em Kavazanjim et al. (1995)
10	-	-	Condição drenada	Benvenuto & Cunha (1991)
13	-	-	Condição saturada	Benvenuto & Cunha (1991)
10	15	30	Ruptura do Aterro de Bandeirantes - SP	Bandeirantes (1991)
5	16	21	Cisalhamento direto. Dois fardos de 400 X 500 X 600 mm	Del Greco & Oggeri (1994)
7	24	22	Cisalhamento direto. Dois fardos de 400 X 500 X 600 mm	Del Greco & Oggeri (1994)
-	10	30	Cisalhamento direto. 1,5 m X 1,5 m - em campo	Withiam et al. (1995)
11,05	24	32,7	Cisalhamento direto drenado. 63,5 mm diâmetro X 23 mm espessura	Gabr & Valero (1995)
7,3	16	35	Triaxial CU (c/ medidas de w/u)	Gabr & Valero (1995)
8	-	-	Resíduos Saturados	Gabr & Valero (1995)
7	-	-	Resíduos Novos	Santos & Presa (1995)
10	-	-	Resíduos após a ocorrência de recalques	
10	0,5	27	Resíduo municipal	Blengimo et al. (1996)

-	16	28	Retro análise de ruptura no aterro de Bandeirantes (1991) Resíduos novos	Kaimoto & Cepollina (1996)
-	16	22	Retro análise de ruptura no aterro de Bandeirantes (1991) Resíduos antigos - boa drenagem	Kaimoto & Cepollina (1996)
-	13,5	22	Retro análise de ruptura no aterro de Bandeirantes (1991) Resíduos antigos - má drenagem	Kaimoto & Cepollina (1996)
7,5	0	35	RSU novos	Strauss (1998)
7,5	0	31	RSU antigos	
10,5	-	-	Sítio São João com 10 meses de alteamento	Mahler & Iturri (1998)
-	40	35	Aterro municipal	Eid et al. (2000)
-	25	35	-	
-	25	31,5	Aterro municipal	Pelky et al. (2001)
-	23	46	Resíduos degradados	Kavazanjian (2001)
15	-	-	EUA	Kavaza & Njian (2001)
7	2	35	Aterro de Canabrava - BA	Oliveira (2002)
-	39,2	29	Resíduo natural, com tensão de 20%	Vilar & Carvalho (2002)
9	-	-	Aterro Sanitário	Catapreta et al. (2005)
11,5	-	-	Portugal	Gomes et al. (2005)
10,87	-	-	Ensaio Percâmetro, Santo André –SP	Carvalho (2006)
12,1	-	-	Aterro com Resíduos Degradados	Bauer (2006)
11	-	-	Mohawk landfill, NY	Harris et al. (2006)
7	10	28	Aterro sanitário	Ribeiro (2007)
-	30	30	Cisalhamento a tensão >200 kPa	Stark et al. (2009)
-	47,5	28	Resíduos novos	Reddy et al. (2009)
-	38	16	Resíduos novos	
-	40	28	Cisalhamento direto - RSU decomposto	Reddy et al. (2011)
-	21	8	Cisalhamento direto - RSU recente	
5	10	28	Prova de carga de talude	
11	13,5	22	Aterro Sanitário de São Paulo	Suzuki (2012)
-	20	25	Aterro sanitário - China	Mohurd (2012)
15	15	35	-	Xu et al. (2012)
	48	34	Correlação de sondagens SPT de aterros	Remédio (2014)
		35		
11,3	18,24	32,27	Aterro sanitário - China	Babu et al. (2014)
15	15	35	Resíduos municipais biodegradados	Giri & Reddy (2014)
9,2	16	40,1	Cisalhamento de grande escala - composto básico de resíduo	Fucale et al. (2015)
7,65	34,7	34,7	Cisalhamento de grande escala - composto básico de resíduo + 20 % de fibras	
9,7		48,1	Cisalhamento de grande escala - composto básico de resíduo + 10 % de fibras	
10,2	14,1	33	-	Hong-Jun (2015)
11	1,3	36,8	Aterro de João Pessoa - cisalhamento direto com 0 % de fibras	GRS (2016)
11	10	33,5	Aterro de João Pessoa - cisalhamento direto com 15 % de fibras	
11	25	29,1	Aterro de João Pessoa - cisalhamento direto com 30 % de fibras	GRS (2016)
13	30	15		
13	25	20	Aterro sanitário - China	Fan et al. (2016)
13	20	25		
10	5	30	Aterro sanitário - Índia	Ering & Gl (2016)

Análises estatísticas

As análises estatísticas realizadas nesta pesquisa foram executadas a partir dos parâmetros de resistência de coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e peso específico (γ) dos resíduos sólidos a partir da compilação estatística dos 80 dados apresentados na Tabela 1.

A partir dos dados compilados, obteve-se os parâmetros estatísticos: médias, modas, medianas, desvio-padrões, variâncias, valores máximos e mínimos.

Logo após, foram efetuadas as criações de Boxplots dos três parâmetros geotécnicos avaliados, para assim efetuar análises de medidas de dispersão dos parâmetros. O intuito principal dessa análise é identificar valores oscilatórios nas análises, outliers, que são valores amostrais atípicos na análise estatística.

Além disso, foram avaliadas as probabilidades das variáveis assumirem determinados valores a partir dos gráficos de funções de densidade de Probabilidade – FDP.

Resultados e Discussão

Os valores obtidos das médias aritméticas e dispersão dos parâmetros de coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e peso específico (γ) estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados da compilação estatística dos parâmetros de aterros de resíduos sólidos. Fonte: Norberto, A. S. (2019).

Parâmetros Estatísticos	γ (kN m^{-3})	c (kPa)	($^\circ$)
Média (μ)	10,66	20,61	28,12
Moda (Mo)	10,00	16,00	35,00
Mediana (Md)	10,69	17,62	30,00
Variância (Var)	9,10	183,91	89,59
Desvio Padrão (DP)	3,02	13,56	9,46
Máximos (Max)	19,00	63,10	48,10
Mínimos (Min)	5,00	0,00	0,00

Dos resultados mostrados na Tabela 2, verificou-se que os valores de média, moda e mediana para o peso específico possuem valores bem próximos entre eles ($\mu = 10,66 \text{ kN m}^{-3}$, $Mo = 10,00 \text{ kN m}^{-3}$ e $Md = 10,69 \text{ kN m}^{-3}$), apresentando variações na ordem decimal. Considerando a coesão, essa variação foi mais acentuada entre moda e média ($\mu = 20,61 \text{ kPa}$, $Mo = 16,00 \text{ kPa}$ e

$Md = 17,62 \text{ kPa}$). O ângulo de atrito foi parâmetro que apresentou uma maior oscilação dentre os valores médios dos três parâmetros estudados, com valores na ordem de: $\mu = 28,12^\circ$, $Mo = 35,00^\circ$ e $Md = 30,00^\circ$. No geral, todos os valores de médias de tendência central se aproximaram entre si, para cada parâmetro.

Quando avaliadas as taxas de dispersão dos resultados, a coesão apresentou uma maior dispersão dos três parâmetros quando comparado o desvio padrão com a média central ($DP_c = 13,56 \text{ kPa}$), seguido pelo ângulo de atrito ($DP_\phi = 9,46^\circ$) e peso específico ($DP_\gamma = 3,02 \text{ kN m}^{-3}$).

Para verificar graficamente a dispersão dos parâmetros, bem como a ocorrência de outliers, foram formulados gráficos do tipo boxplot. Na Figura 1 é mostrado o resultado do boxplot para os dados do peso específico.

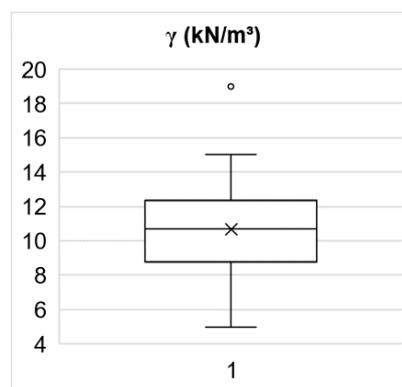


Figura 1. Gráfico boxplot dos dados de peso específico de aterros de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU. Fonte: Norberto, A. S. (2019).

Na análise dos aspectos do boxplot para o peso específico, observou-se a coincidência entre os resultados de mediana e média, e quanto a dispersão, apresentou uma certa simetria entre as caixas, que é dada pela diferença entre o terceiro quartil e o primeiro quartil. A frequência do peso específico na amostragem teve média de $10,7 \text{ KN/m}^3$. A maioria dos valores ficaram na faixa de frequência de $8,75$ a $12,33 \text{ kN m}^{-3}$, mas alguns valores apresentaram frequência tão baixos quanto $4,8 \text{ kN m}^{-3}$ e tão elevadas quanto 15 kN m^{-3} . O gráfico apresentou dois outliers de peso específico de coincidente valor, 19 kN m^{-3} , estes valores apresentam-se distante dos demais valores analisados, podendo influenciar para uma tendência não realística do comportamento estatístico dos dados.

A partir da interpretação da Figura 1, observa-se também que a variação entre mínimos e máximos pode ser considerada grande, sendo que isto se deve ao fato das amostragens terem sido

realizadas em diferentes tipos de resíduos reportados pelas literaturas, sendo o peso específico diretamente relacionado a gravimetria, a qual depende de aspectos econômicos, regionais e sociais da população produtora dos resíduos (Lopes & Gomes, 2013).

A análise seguinte será a do boxplot para os dados da coesão, os resultados estão apresentados na Figura 2.

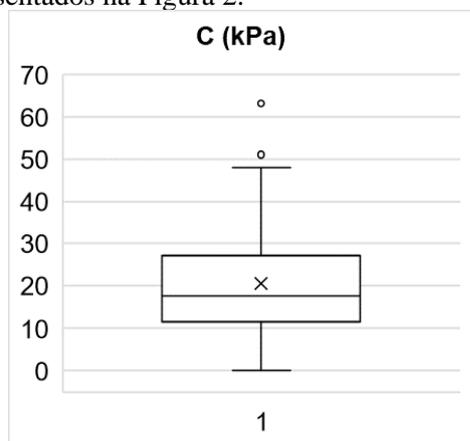


Figura 2. Gráfico boxplot dos dados de coesão de aterros de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU. Fonte: Norberto, A. S. (2019).

Para da análise da coesão, verificou-se que a média apresentou valor superior a mediana. Quanto à dispersão, constatou-se uma assimetria superior representado uma maior concentração de dados entre os quartis Q2 e Q3. Com relação à frequência da amostra, a mesma obteve uma média de 20,60 KPa, e a maioria dos valores tiveram frequência na faixa entre 10,00 e 27,25 kPa, mas alguns valores apresentaram frequência tão baixos quanto 0 kPa e tão elevadas quanto 48,7 kPa. O boxplot também apresentou dois outliers para análise do conjunto de dados da coesão, sendo eles: 51 e 63,1 kPa, esses valores apresentam-se distante dos demais, e estatisticamente podendo influenciar para uma tendência não realística dos dados.

Considerando os valores máximos e mínimos, estes apresentaram-se muito distantes entre si, este fato é decorre de que os dados dos parâmetros geotécnicos utilizados na análise não relacionam as condições de idades dos resíduos, sendo a decomposição temporal importante parâmetro de influência na variação da coesão, como foi afirmado por diversos estudos: Kölsch (1993), Kockel (1995), Xu et al. (2011), Petrovic et al. (2016) e Hong-Jun et al. (2015).

Dando sequência às análises, na Figura 3 estão apresentados os resultados do boxplot para a compilação estatística dos dados do ângulo de atrito.

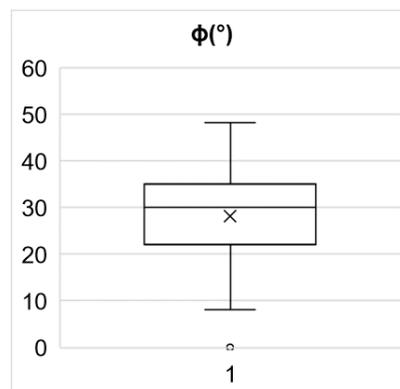


Figura 3. Gráfico boxplot dos dados de ângulo de atrito de aterros de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU. Fonte: Norberto, A. S. (2019).

Quanto à análise dos dados do ângulo de atrito, obteve-se uma média de valor inferior a mediana, que é possível constatar graficamente. Considerando a dispersão, a mesma apresentou uma assimetria inferior, representando uma maior concentração de dados entre os quartis Q1 e Q2. A frequência da mostra teve média de 28,12°, e a maioria dos valores tiveram frequência na faixa entre 22,00 e 35,00°, mas alguns valores apresentaram frequência tão baixos quanto 8° e tão elevadas quanto 48°. O gráfico apresentou um outlier para o ângulo de atrito, de valor 0°, por tal valor apresentar-se distante dos demais.

Como o ângulo de atrito é função direta da interação entre as partículas e do tamanho das mesmas, pode-se afirmar que a variação apresentada entre os valores máximos e mínimos na análise decorrem de os resultados utilizados serem provenientes de ensaios de campo e laboratório, sendo está uma possível causa da variação. E quanto aos ensaios de laboratório, os mesmos provêm de dados de ensaios de grande escala e de menor escala, sendo uma possível causa da variação dos dados, tendo em vista que a escala do ensaio incide diretamente na representatividade do resultado (Fucale, 2005).

O processamento seguinte da análise estatística dos parâmetros, consistiu no desenvolvimento das funções densidade de probabilidade, as quais descrevem as probabilidades relativas de uma variável aleatória tomar um valor dado, isso para os três parâmetros avaliados estatisticamente. Com elas é possível avaliar de formar mais clara a probabilidade de os três parâmetros estudados se comportarem probabilisticamente.

Na Figura 4 são apresentados os resultados da compilação estatística na formulação da FDP dos dados de peso específico.

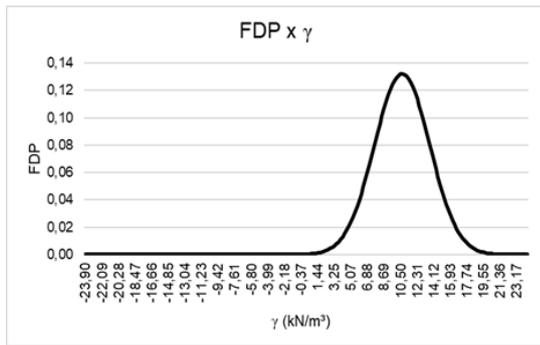


Figura 4. Função densidade probabilidade do peso específico de aterros de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU para os dados avaliados. Fonte: Norberto, A. S. (2019).

É possível identificar o intervalo de probabilidade de maior ocorrência do peso específico pelas análises da FDP, que neste caso está no intervalo de $6,88 - 14,12 \text{ kN m}^{-3}$. Isso corresponde dizer que aleatoriamente um dado valor de peso específico tem grande probabilidade de assumir valores neste intervalo. Além disso, este parâmetro apresentou o menor intervalo de probabilidade comparado aos demais, dado seu valor relativamente pequeno do desvio padrão.

Na sequência da análise, na Figura 5 são apresentados os resultados da compilação estatística na formulação da FDP dos dados de coesão.

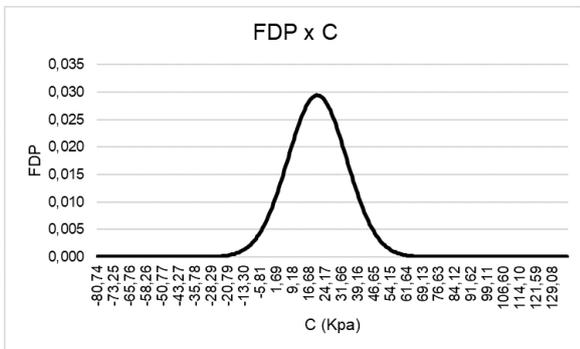


Figura 5. Função densidade probabilidade da coesão de aterros de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU para os dados avaliados. Fonte: Norberto, A. S. (2019).

É possível identificar o intervalo de probabilidade de maior ocorrência da coesão na FDP, no intervalo de $1,69 - 39,16 \text{ kPa}$. Isso corresponde dizer que aleatoriamente um dado valor de coesão tem grande probabilidade de assumir valores neste intervalo. Verificou-se pela análise da FDP que a coesão apresentou o intervalo de probabilidade mais amplo, vide seu desvio padrão mais alto comparado aos demais parâmetros.

Na Figura 6 são apresentados os resultados da compilação estatística na formulação da FDP dos dados de ângulo de atrito.

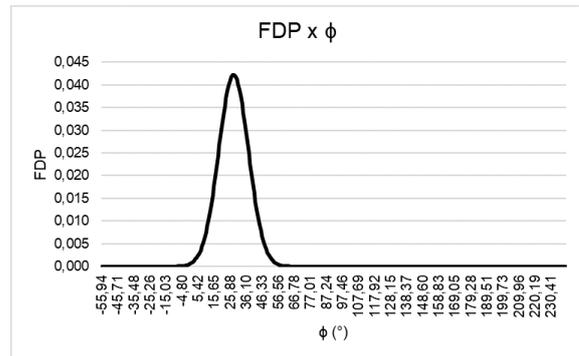


Figura 6. Função densidade probabilidade do ângulo de atrito de aterros de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU para os dados avaliados. Fonte: Norberto, A. S. (2019).

A última FDP avaliada é a correspondente aos dados de ângulo de atrito, a qual apresentou um maior intervalo de probabilidade entre $15,65 - 36,10 \text{ kPa}$. Isso corresponde dizer que aleatoriamente um dado valor de coesão tem grande probabilidade de assumir valores neste intervalo. O ângulo de atrito apresentou um número de valores bem concentrados aos valores médios.

Conclusão

Quanto à variabilidade dos parâmetros geotécnicos de aterros sanitários, o agrupamento dos diversos resultados das literaturas mostrou uma alta variabilidade dos parâmetros, vide os valores dos desvios padrões obtidos. Tais oscilações decorrem da não uniformidade da gravimetria de resíduos, sendo a mesma condicionada por diversos aspectos característicos de cada região produtora do resíduo.

Dentre os três parâmetros geotécnicos avaliados o peso específico foi o que mais se mostrou uniforme de forma geral, a coesão se mostrou altamente variável, tal fato decorre da mesma ser o parâmetro que está associado ao efeito das fibras na resistência ao cisalhamento.

De forma geral, as avaliações estatísticas comprovaram os aspectos oscilatórios dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de resíduos. O agrupamento de dados viabiliza análises gerais de aspectos que podem ser condicionantes na estabilidade de taludes de aterros de RSU.

É possível identificar o intervalo de probabilidade de maior ocorrência do peso específico pelas análises da FDP. Isso corresponde dizer que aleatoriamente um dado valor de peso específico tem grande probabilidade de assumir valores neste intervalo. Além disso, este parâmetro

apresentou o menor intervalo de probabilidade comparado ao ângulo de atrito e coesão.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro.

Referências

- Babu, G. L. S.; Reddy, K. R.; Srivastava, A. 2014. Influence of Spatially Variable Geotechnical Properties of MSW on Stability of Landfill Slopes. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 18, (1), 27-37. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000177](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000177).
- Benvenuto, M. 2016. Recuperação e adequação de escorregamentos de aterros sanitários. Workshop – Resíduos Urbanos, desafios para a administração pública. São José dos Campos, RJ. Disponível em: <http://www.ablp.org.br/pdf/Clovis-Benvenuto.pdf>. Acesso em: 04 de agosto de 2018.
- Borgatto, A. V. A. 2010. Estudo das Propriedades Geomecânicas de Resíduos Sólidos Urbanos Pré-Tratados. Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Civil.
- Boscov, M. E. G. 2008. Geotecnia ambiental. Oficina de textos.
- Cardim, R. D. 2008. Estudo da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por meio de Ensaio de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- Ering, P.; GL, S. B. 2016. Stress deformation analysis of MSW landfills. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2, (57), 1960-1965. <http://doi.org/10.3208/jgssp.TC215-03>.
- Fan, X.; Huang, M.; Liu, Y.; Wang, H. 2016. Stability analysis of MSW slope layered by aging. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2, (50), 1753-1756. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2408-8>.
- Fucale, S. P. 2005. Influência dos Componentes de Reforço na Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE.
- Giri, R. K.; Reddy, K. R. 2014. Slope stability of bioreactor landfills during leachate injection: effects of heterogeneous and anisotropic municipal solid waste conditions. *Waste Management & Research*, 32, (3), 186-197. <https://doi.org/10.1177/0734242X1452249>.
- GRS – Grupo de Resíduos Sólidos (UFPE). 2016. Relatório: Ensaio de caracterização e resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos do aterro sanitário metropolitano de João Pessoa - PB. Universidade Federal de Pernambuco.
- Hong-Jun, S.; Yan-Chao, F.; Li-Hong, Z. 2015. Sensitivity Analysis on Stability Parameters in Landfill. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 9, (1), 108-111. Doi: 1874-8368/15.
- Jahanfar, A.; Gharabaghi, B.; McBean, E. A.; Dubey, B. K. 2017. Municipal solid waste slope stability modeling: a probabilistic approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143, (8), 04017035. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001704](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001704).
- Kockel, R. 1995. Scherfestigkeit von Mischabfall im Hinblick auf die Standsicherheit von Deponien. Inst. für Grundbau.
- Kölsch, F. 1993. The bearing behaviour of domestic waste and related consequences for stability. In *Proceedings Sardinia*, 93, 1393-1410.
- Kölsch, F. 1993. The bearing behaviour of domestic waste and related consequences for stability. In: *Proceedings Sardinia*. pp. 1393-1410.
- Lopes, M. L.; Gomes, C. C. 2015. Geotechnical landfill monitoring—adaptations needed. *Environmental Geotechnics*, 2, (1), 8-17.
- Ministério do Meio Ambiente. 2014. Política Nacional de Resíduos sólidos (PNRS). Disponível em: <http://www.mma.gov.br/pol%c3%adtica-de-res%c3%adduos-s%c3%b3lidos>. Acesso em: 01 de dezembro de 2018.
- Petrovic, I.; Hip, I.; Fredlund, M. D. 2016. Application of continuous normal-lognormal bivariate density functions in a sensitivity analysis of municipal solid waste landfill. *Waste management*, 55, 141-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.021>.
- Remédio, F. H. 2014. Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com Nspt. Dissertação - (mestrado) - Universidade

Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais.

Silveira, A. M. M. 2004. Estudo do peso específico de resíduos sólidos urbanos. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Strauss, M. 1998. Análise de estabilidade de talude do aterro sanitário da zona norte de Porto

Alegre. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Xu, Q.; Tolaymat, T.; Townsend, T. G. 2012. Impact of pressurized liquids addition on landfill slope stability. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 138, (4), 472-480. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000609](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000609).