



ANÁLISE BIDIMENSIONAL DA ESTABILIDADE DE TALUDE DE ATERRO SANITÁRIO NA PRESENÇA DE PLÁSTICO MOLE

RESUMO

O aumento da população combinado com o alto consumismo da sociedade resulta em um inchaço na produção de resíduos. Em países em desenvolvimento, uma alta fração do resíduo é destinado para algum tipo de aterro sanitário. O artigo busca obter os parâmetros de cisalhamento de um aterro sanitário e calcular os fatores de segurança do talude, variando a inclinação. Os materiais para simular o aterro sanitário são plástico mole, areia como comportamento granular de resíduo sólido, lixiviado obtido de um aterro sanitário local e um composto que é resíduo sólido obtido do mesmo aterro sanitário. Os materiais foram moldados e ensaiados no equipamento de cisalhamento direto. Com os parâmetros de cisalhamento um modelo computacional foi gerado para a análise de estabilidade. Os resultados de fatores de segurança para taludes com ângulos maiores que $1V/2H$ foram abaixo do recomendado (1.5), portanto é altamente recomendado o uso de taludes com ângulos iguais ou menores que $1V/2H$ devido ao risco de rompimento.

Palavras-chave: Efeito fibra. Aterro sanitário. Deslizamento. Cisalhamento.

INTRODUÇÃO

O aumento da população combinado com a mudança no estilo de vida acarreta no acréscimo da produção de resíduos. Em função disso, muitas práticas vêm sendo adotadas para que o impacto gerado por essa produção seja, ao mínimo, mitigado, no entanto, ainda grande porção dos resíduos é destinada a algum tipo de aterro (SHARIATMADARI; ASADI; KARIMPOUR-FARD, 2017), como o aterro sanitário (VILAR; CARVALHO, 2004).

Dados coletados pela ABRELPE (2017), afirmam que em 2007 a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) foi de 61,5 milhões de toneladas no país, enquanto

TEIXEIRA, Wagner.
Mestrado em Engenharia Civil (PPGEC); Graduação em Engenharia Civil (UTFPR).
Professor (SINERGIA).
teixeira.wagner@hotmail.com
<http://lattes.cnpq.br/8128512515450603>

FELTRIM, Fernanda.
Mestrado em Engenharia Civil (PPGEC); Graduação em Engenharia Ambiental (UTFPR).
fernandafeltrim@hotmail.com
<http://lattes.cnpq.br/9850937270744559>

GAWLIK, Francismara Martins.
Mestrado em Engenharia Civil (PPGEC); Especialização em Educação Profissional – PROEJA (UTFPR); Graduação em Engenharia Civil (UTFPR).
Professora (SENAI/PR).
francismara.martins@sistemafiep.org.br
<http://lattes.cnpq.br/1657071534842519>

IZZO, Ronaldo Luis dos Santos.
Doutorado em Geotecnia Ambiental (UFRJ); Mestrado em Engenharia Industrial (UNESP); Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho (UNESP); Graduação em Engenharia Civil (UNIMAR).
izzo@utfpr.edu.br
<http://lattes.cnpq.br/8384136461605241>

TEIXEIRA, Wagner et al. Análise bidimensional da estabilidade de talude de aterro sanitário na presença de plástico mole. **REFS – Revista Eletrônica da Faculdade Sinergia**, Navegantes, v.10, n.16, p. 60-69, jul./dez. 2019.

que, no ano de 2016, a geração de RSU foi de 78,3 milhões de toneladas, aumento de 27%. No ano de 2016, foram destinados a aterros sanitários cerca de 58,4% dos RSU coletados no país.

Segundo Vilar e Carvalho (2004), essas obras, além de serem vistas sob perspectivas sanitárias e ambientais, também devem ser vistas como uma obra de engenharia. Logo, propriedades mecânicas são importantes para encarar questões como estabilidade contra falhas, deformação e tensões impostas ao solo da fundação.

Os problemas de estabilidade de aterros, muitas vezes, não foram resolvidos (SHARIATMADARI; ASADI; KARIMPOUR-FARD, 2017), ou até mesmo negligenciados (ZHAO et al., 2014), acarretando vários acidentes, alguns sendo relatados por Koerner e Soong. Koerner e Soong (1999) citam acidentes na década de 90 nos Estados Unidos envolvendo mais de 1 milhão de metros cúbicos de resíduos entre falhas rotacionais e translacionais. Um outro acidente na África envolveu 300 mil m² de resíduos e, por fim, na América do Sul, um milhão de metros cúbicos em um acidente, num aterro sanitário, em 1997.

Dentre os aspectos investigados na estabilidade de aterros, muitos estudos estão voltados à força de cisalhamento envolvida na massa de resíduos (VILAR; CARVALHO, 2004; REDDY et al., 2009; BAREITHER; BENSON; EDIL, 2012; ZHAO et al., 2014; OJURI; ADEGOKE, 2015; LI; SHI, 2016; KAUSHAL et al., 2017) e também ao efeito fibra proporcionado por materiais com características

fibrosas presentes na massa (GAWLIK et al., 2013; CORREA; JUCÁ; MOTTA, 2015; SHARIATMADARI; ASADI; KARIMPOUR-FARD, 2017).

Pesquisadores como Griffiths e Lane (1999), Chugh (2003) e Griffiths e Marquez (2007), têm analisado estabilidade de taludes usando elementos finitos e elementos finitos discretos e mostram que os procedimentos fornecem comparáveis resultados com os procedimentos de equilíbrio limite.

Reyes e Parra (2014), discursam que a maioria das análises atuais de estabilidade de taludes são resolvidas com os métodos Morgenstern & Price, Equilíbrio Limite Generalizado e Spencer. O procedimento de Spencer é mais adequado, pois exige a seleção de funções apropriadas de forças entre as fatias, no entanto apresenta problemas de convergência.

Os materiais para simular um aterro sanitário são plástico mole, areia como comportamento granular de resíduo sólido, lixiviado obtido de um aterro sanitário local e um composto que é resíduo sólido obtido do mesmo local. Seus parâmetros de cisalhamento foram obtidos através do ensaio de cisalhamento direto drenado. Uma análise computacional foi executada para obter os fatores de segurança de um talude de um aterro sanitário. O artigo busca obter esses parâmetros e calcular os fatores de segurança possíveis, variando a inclinação do talude. Com os fatores de segurança, o aterro sanitário pode trabalhar com o seu rendimento máximo e dentro dos parâmetros de segurança.

1 ESTABILIDADE E FATOR DE SEGURANÇA EM ATERROS SANITÁRIOS

Stark e Eid (1998) afirmam que a maioria das análises de estabilidade de taludes são executadas através do método de equilíbrio limite em duas dimensões. Os métodos calculam o fator de segurança contra falhas de um talude, assumindo a condição de um plano de deformação. Entretanto, é implicitamente assumido que a falha se estende indefinidamente. Claramente, taludes não são

infinitamente amplos, uma análise de três dimensões influencia no resultado. Duncan (1992), defende que, em geral, uma análise de duas dimensões é apropriada, pois obtém-se um resultado conservador para o fator de segurança.

Skempton (1985), sugere um fator de correção para uma análise de duas dimensões, enquanto que, Stark e Eid (1998), contrapõem-

se que uma análise de três dimensões é recomendada para retroanálise de taludes. Skempton (1985), reporta que usualmente a resistência ao cisalhamento do talude aumenta 5% em uma análise em três dimensões. Uma análise de duas dimensões é claramente apropriada para projetos de aterros sanitários.

Liu et al. (1997) discutem sobre a acurácia de um fator de segurança e afirmam que o fator de segurança 1.5 é comumente usado para projetos para taludes em aterros sanitários. Esse fator de segurança veio de projetos de barragens, o qual foi obtido por experiências nos últimos 50 anos, indicando que provem de um razoável equilíbrio entre custo e desempenho. Defendem, então, que a magnitude de incerteza no projeto e as consequências de falha são diferentes. Essas diferenças consistem, principalmente, na interface do plano de cisalhamento e pressões de fluido, água e gás. Os autores concluem que um apropriado fator de segurança para um aterro sanitário varia entre 1.1 até maior que 1.5, dependendo da quantidade de variáveis incertas e do custo de falha.

Diante do exposto, alguns autores comentam sobre a estabilidade de taludes, como é o caso de Peng et al. (2016), os quais realizaram retroanálise de um rompimento do aterro sanitário de Shenzhen, na China. O estudo mostra características de deformação e o tipo de falha induzidos por altos níveis de água. Através da retroanálise, os autores concluíram que o rompimento no talude do aterro sanitário ocorreu devido à falha do sistema de drenagem de lixiviado, elevando os

níveis de água após fortes períodos de chuva, consequentemente, aumentando o peso da massa do resíduo.

Gharabaghi et al. (2008), realizaram uma comparação da estabilidade de taludes de dois aterros sanitários municipais brasileiros, Cruz das Almas, em Maceió, e Muribeca, em Recife. Após análise, afirmam haver uma grande divergência no resíduo urbano de um aterro sanitário para outro. Por fim, concluíram que cuidados devem ser tomados quando assumido condições de poropressão e de peso específico, já que o fator de segurança depende, principalmente, desses parâmetros.

Eid et al. (2000), apontam dificuldades em determinar as propriedades de cisalhamento do resíduo municipal urbano devido à heterogeneidade dos resíduos dispostos, a dificuldade de obter e ensaiar amostras representativas, mudanças das propriedades com o tempo e incompatibilidade de deformações dos materiais.

Percebe-se que selecionar parâmetros apropriados de resistência ao cisalhamento é um aspecto chave da estabilidade de taludes, recaindo em informações da composição do resíduo, compactação, tamanho partículas, degradação e umidade.

Duplancic (1990) afirma que técnicas laboratoriais podem efetivamente serem usadas para a performance de aterros sanitários, enquanto métodos computacionais, quando cuidadosamente aplicados, também podem ser usados para estabilidade e avaliação de deformação de aterros sanitários.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Os ensaios de resistência ao cisalhamento direto foram executados, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Campanha de ensaios de cisalhamento direto.

	1	Areia
PRIMEIRA FASE	2	Areia + Plástico
	3	Areia + Plástico + Lixiviado (6 semanas)

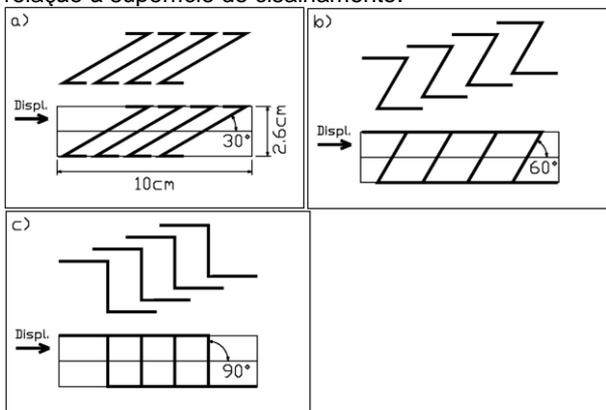
SEGUNDA FASE	4	Composto
	5	Composto + Plástico

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os materiais adotados buscam simular o mais próximo cenário existente em um aterro sanitário. Para analisar a influência das fibras na massa de resíduo, foram utilizadas tiras de sacolas plásticas de supermercado com dimensões de 0,5 cm de largura e 7,5 cm de

comprimento. O lixiviado utilizado foi coletado em um aterro sanitário. A areia do tipo média foi obtida para simular o comportamento granular característico do resíduo sólido urbano. O composto utilizado nos ensaios, também proveniente do mesmo aterro sanitário, recebe um tratamento de compostagem aeróbica estática. O composto foi selecionado devido à semelhança ao material depositado nos aterros sanitários, após longos períodos enterrados.

Figura 1 – Esquema de configuração com tiras plásticas em relação à superfície de cisalhamento.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os corpos de prova classificados como primeira fase possuem os seguintes materiais: apenas areia; areia com a inserção de fibras plásticas “*in natura*” e areia com a inserção de fibras plásticas imersas em lixiviado durante 6 semanas. Cada corpo de prova foi moldado com 340g de areia em um teor de umidade de 7,58%, conforme densidade máxima obtida em ensaio de proctor normal, seguindo a norma D-698 (AMERICAN..., 2003).

Os corpos de prova classificados como segunda fase possuem os seguintes materiais: apenas composto e composto com a inserção de fibras plásticas “*in natura*”. Cada corpo de prova foi moldado com 220g de composto em um teor de umidade de 26%, conforme densidade máxima obtida em ensaio de proctor normal.

Os ensaios de cisalhamento direto foram executados com um equipamento de cisalhamento direto sob taxa constante de velocidade, seguindo a norma D-6528 (AMERICAN..., 2017). A taxa de deslocamento

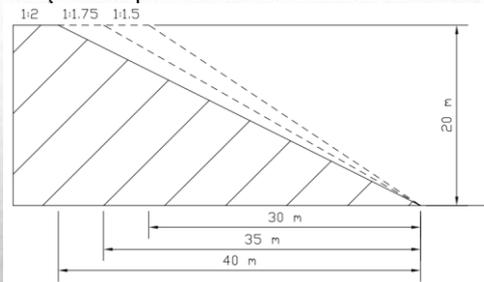
utilizada foi de 1 mm min^{-1} , em três tensões normais de 50 kPa, 100kPa e 200kPa.

2.2 MODELAGEM EM SOFTWARE

Parâmetros de cisalhamento e peso unitário dos materiais ensaiados foram usados como entrada no software GEOSlope W/2012. A ferramenta computacional divide o plano de cisalhamento em 30 fatias com tamanho mínimo de superfície de cisalhamento em 0.1 m e intervalos de fatores de segurança em 0.001, número de pontos de deslizamento da superfície, iniciando em 8 e finalizando em 16 com um número máximo de 2000. Método Spencer foi utilizado para calcular o fator de segurança (SPENCER, 1967). O software GEOSlope W/2012 está sob licença estudantil, disponível em <http://www.geo-slope.com>.

O talude no aterro sanitário simulado possui uma altura de 20 metros para uma distância horizontal de 40m (Figura 2). O software foi setado com os mesmos valores e, portanto, variou-se a distância horizontal (linhas tracejadas), com os parâmetros de intercepto coesivo e ângulo de atrito, obtidos em ensaios de laboratório. O valor do peso específico da massa de resíduo é extremamente variado na literatura, logo, foi optado por trabalhar com um peso específico que caracteriza um aterro sanitário no Brasil, com tempo de operação considerável. O peso específico adotado foi de 16 kN/m^3 , conforme Carvalho et al. (2005). Este parâmetro é viável, pois a coesão e o ângulo de atrito encontrados foram obtidos com areia e composto, materiais que caracterizam resíduo com elevado tempo de deposição.

Figura 2 – Esquema de configuração com tiras plásticas em relação à superfície de cisalhamento.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3 RESULTADOS

A partir dos ensaios de cisalhamento direto, foi possível encontrar os valores de intercepto de coesão e ângulo de atrito. Os resultados referentes à primeira campanha, a qual foi realizada com areia, podem ser observados nas Tabelas 2 e 5. Os resultados são discutidos nos parágrafos seguintes.

Os ensaios realizados com 30° apresentaram um aumento de cerca de 5,8% do ângulo de atrito em função da adição de tiras plásticas à areia, mas o contato das tiras plásticas com o lixiviado, fez com que houvesse uma redução no ângulo de atrito de 12,2%, em relação ao ângulo de atrito da areia com tiras plásticas que não tiveram contato com lixiviado.

No entanto, ao se adicionar tiras plásticas numa angulação de 60° à areia, verifica-se que não há uma variação significativa do ângulo de atrito. Por outro lado, quando foram adicionadas tiras plásticas imersas no lixiviado durante 6 semanas, observa-se um pequeno aumento no ângulo de atrito (3,5%), em relação à areia com tiras plásticas que não tiveram contato com o lixiviado.

Quando os ensaios realizados com 90° são observados é notado um aumento de 14,6% do ângulo de atrito com incremento de tiras plásticas à areia. No entanto, quando as tiras plásticas são expostas ao lixiviado por 6 semanas, verifica-se redução de 21,1% do ângulo de atrito em relação ao ensaio realizado com o plástico sem imersão no lixiviado e 9,52% em relação ao ensaio realizado apenas com areia.

Com relação às coesões, observa-se incremento das mesmas quando é acrescentado plástico que foi imerso no lixiviado. O valor que mais se destacou foi o obtido com ângulo de 30° (8,8 kPa).

Tabela 2 – Valores de ângulo de atrito interno (ϕ) e intercepto coesivo (c) obtidos no ensaio de cisalhamento direto.

Material	Valores de ângulo de atrito interno ($^{\circ}$)	Valores de intercepto coesivo (kPa)
Areia	31,65	0
Areia + Plástico (30°)	33,49	0

Areia + Plástico (60°)	31,69	0
Areia + Plástico (90°)	36,26	0
Areia + Plástico (6 semanas) (30°)	29,41	8,8
Areia + Plástico (6 semanas) (60°)	32,80	2,71
Areia + Plástico (6 semanas) (90°)	28,61	3,78

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para os ensaios de cisalhamento direto moldados com o composto orgânico, foram realizados ensaios com corpo de prova moldados apenas com composto e composto com tiras plásticas (Tabelas 3 e 6).

Observa-se que há um aumento progressivo do ângulo de atrito do composto, quando se adiciona tiras plásticas ao mesmo nas inclinações de 30° e 60°, sendo o aumento máximo da ordem de 21%. No entanto, quando se aumenta o ângulo de inclinação das tiras plásticas para 90°, verifica-se que há uma diminuição de 4,5% do ângulo de atrito do composto em relação à inclinação de 60°. Com relação à coesão, observa-se que há uma diminuição progressiva do intercepto de coesão, quando se adiciona tiras plásticas ao composto para as inclinações de 30° e 60°, com redução máxima de 70%. Por outro lado, não houve grande diferença entre a coesão com 60° e a coesão com 90°, sendo esta última 61% menor do que a coesão encontrada apenas com composto (Tabela 3).

Tabela 3 – Valores de ângulo de atrito interno (ϕ) e intercepto coesivo (c) obtidos no ensaio de cisalhamento direto.

Material	Valores de ângulo de atrito interno ($^{\circ}$)	Valores de intercepto coesivo (kPa)
Composto	27,78	6,67
Composto + Plástico (30°)	30,58	4,06
Composto + Plástico (60°)	33,52	2,03
Composto + Plástico (90°)	32,02	2,58

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na literatura, encontra-se uma grande variedade de valores para ângulo de atrito e intercepto coesivo em aterros sanitários.

Gharabaghi et al. (2008), fizeram um apanhado de valores de ângulo de atrito e intercepto coesivo (Tabela 4). Novas pesquisas também estão incluídas.

Muitos autores encontraram valores de ângulo de atrito próximos aos resultados desta pesquisa, na maioria por diferentes ensaios, sendo o caso de Gomes, Lopes e Oliveira (2013), Grisolia, Napoleoni e Tancredi (1995), Houston et al. (1995), Jessberger, Syllwasschy e Kockel (1995), Kavazanjian et al. (1995), Landva e Clark (1990), Pelkey, Valsangkar e Landva (2001), Vilar e Carvalho (2002), Withiam et al. (1995).

Os valores de intercepto de coesão são variados, não possuindo direta relação. O material predominante da massa de resíduo é variado, por conseguinte seus parâmetros de cisalhamento.

Tabela 4 – Valores de resistência ao cisalhamento de resíduos na literatura.

Referência	Parâmetros de cisalhamento		Método de obtenção
	c' (kPa)	ϕ' (°)	
Cowland; Tang e Gabay (1993)	10	25	Retroanálise de um corte de trincheira de resíduos
Eid et al. (2000)	25	35	DS de grande porte e retroanálise de quatro taludes rompidos
Gabr e Valero (1995)	17	34	CU de pequeno porte (valores com 20% de deformação relativa axial)
Gomes, Lopes e Oliveira (2013)	29.5	32.5	CU de pequeno porte, 4-9 metros de profundidade (valores com 15-20% de deformação relativa axial)
Gomes, Lopes e Oliveira (2013)	12.5	34.8	CU de pequeno porte, 11-14 metros de profundidade (valores com 15-20% de deformação relativa axial)
Grisolia et al. (1995)	2-3	15-20	Triaxial de grande porte (valores com 10-15% de deformação relativa axial)
	10	33-35	Triaxial de grande porte (valores com 10-15% de deformação relativa axial)
Houston et al. (1995)	5	33-35	DS de grande porte em amostras indeformadas

Jessberger, Syllwasschy e Kockel (1995)	0	30	Triaxial de pequeno e grande porte
Kavazanjian et al. (1995)	24	0	Para tensões normais menores que 30 kPa
	0	30	Para tensões normais maiores que 30 kPa
Karimpour-Fard et al. (2011)	7	36	CU de pequeno porte, sem fibras (valores com 20% de deformação relativa axial)
Karimpour-Fard et al. (2011)	5	51	CU de pequeno porte, 25% de fibras (valores com 20% de deformação relativa axial)
Landva e Clark (1990)	0-23	24-41	DS
Landva e Clark (1986)	10-23	24-42	DS em resíduos de vários aterros sanitários canadenses
Pelkey, Valsangkar e Landva (2001)	0	26-29	DS de grande porte
Siegel, Robertson, e Anderson (1990)	0	39-53	DS com 10% de deslocamento, intercepto coesivo assumido como zero
Vilar e Carvalho (2002)	39.2	29	Com umidade natural (valores com 20% de deformação relativa axial)
	60.7	23	Amostras saturadas (valores com 20% de deformação relativa axial)
Withiam et al. (1995)	10	30	DS de grande porte

Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: DS, Ensaio de cisalhamento direto; CU, Ensaio triaxial consolidado não drenado.

Utilizando os valores de ângulo de atrito e coesão obtidos com os ensaios de cisalhamento direto, foi possível analisar os fatores de segurança para cada caso, os quais foram realizados através do software GEOSlope W/2012.

Os resultados de cisalhamento somente com a areia obtiveram um fator de segurança de 1.235 (Tabela 5), com a inclinação de 1V:2H, inclinação verificada no talude do aterro sanitário. A análise de estabilidade com plástico mole sem imersão no lixiviado obteve um fator de segurança abaixo de 1.5 para todas as angulações do plástico e com diferentes inclinações do talude, fato explicado pela falta de coesão.

O plástico mole imerso em lixiviado gerou um valor de intercepto coesivo, auxiliando na estabilidade do talude. As análises da areia com o plástico imerso em lixiviado resultaram em fatores de segurança superiores e próximos de 1.5, para inclinações de 1V:2H. Por outro lado, quando houve aumento da inclinação do talude, os valores de fator de segurança tenderam a diminuir, ou seja, com todos os valores abaixo de 1.5.

Destacam-se os valores de areia com plástico não imerso em lixiviado, para angulações maiores que 1V:2H. Em um ângulo de talude de 1V:1.75, a estabilidade é comprometida, chegando à fatores de segurança próximos do valor unitário. Em um ângulo de talude de 1V:1.5, a estabilidade é levemente melhorada, porém a massa mobilizada na ruptura é significativamente maior.

Tabela 5 – Fatores de segurança da areia para cada análise.

Material	Fator de segurança	Inclinação do talude	Material acumulado (m ³ /m)
Areia	1,235	1V/2H	0
Areia + Plástico (30°)	1,326	1V/2H	0
Areia + Plástico (60°)	1,237	1V/2H	0
Areia + Plástico (90°)	1,470	1V/2H	0
Areia + Plástico (30°)	1,649	1V/2H	0
(6 semanas)			
Areia + Plástico (60°)	1,63	1V/2H	0
(6 semanas)			
Areia + Plástico (90°)	1,431	1V/2H	0
(6 semanas)			
Areia	1,081	1V/1,75H	0
Areia + Plástico (30°)	1,16	1V/1,75H	0
Areia + Plástico (60°)	1,082	1V/1,75H	0
Areia + Plástico (90°)	1,286	1V/1,75H	0
Areia + Plástico (30°)	1,469	1V/1,75H	50
(6 semanas)			
Areia + Plástico (60°)	1,354	1V/1,75H	50
(6 semanas)			
Areia + Plástico (90°)	1,223	1V/1,75H	50

(6 semanas)			
Areia	1,2	1V/1,5H	100
Areia + Plástico (30°)	1,289	1V/1,5H	100
Areia + Plástico (60°)	1,202	1V/1,5H	100
Areia + Plástico (90°)	1,428	1V/1,5H	100
Areia + Plástico (30°)	1,340	1V/1,5H	100
(6 semanas)			
Areia + Plástico (60°)	1,334	1V/1,5H	100
(6 semanas)			
Areia + Plástico (90°)	1,17	1V/1,5H	100
(6 semanas)			

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados de cisalhamento somente com o composto obtiveram um fator de segurança de 1.45 (Tabela 6), com a inclinação de 1V:2H, conforme verificado no talude do aterro sanitário. A análise de estabilidade com plástico mole, obteve um fator de segurança próximo de 1.5 para todas as angulações do plástico e talude também com inclinação de 1V/2H.

As mesmas análises com composto ou composto mais plástico foram realizadas para maiores angulações de talude. As inclinações de 1V:1.75H e 1V:1.5H obtiveram fatores de segurança entre 1.2 e 1.3.

Tabela 6 – Fatores de segurança do composto para cada análise.

Material	Fator de segurança	Inclinação do talude	Material acumulado (m ³ /m)
Composto	1,45	1V/2H	0
Composto + Plástico (30°)	1,469	1V/2H	0
Composto + Plástico (60°)	1,518	1V/2H	0
Composto + Plástico (90°)	1,472	1V/2H	0
Composto	1,307	1V/1,75H	50
Composto + Plástico (30°)	1,324	1V/1,75H	50
Composto + Plástico (60°)	1,345	1V/1,75H	50
Composto + Plástico (90°)	1,311	1V/1,75H	50
Composto	1,211	1V/1,5H	100
Composto + Plástico (30°)	1,267	1V/1,5H	100
Composto + Plástico (60°)	1,35	1V/1,5H	100

Composto + Plástico (90°)	1,293	1V/1,5H	100
---------------------------	-------	---------	-----

Fonte: Elaborado pelos autores.

CONCLUSÃO

Os parâmetros de cisalhamento obtidos em laboratório e através da análise computacional geram as seguintes conclusões:

Através do cisalhamento direto com areia, areia mais plástico não imerso e imerso em lixiviado, obtiveram-se resultados de ângulo de atrito semelhantes entre si. Para os valores de intercepto de coesão, a areia com adição de plástico imerso em lixiviado, gerou um valor de coesão entre 2.7 e 8.8 kPa.

Através do cisalhamento direto para o composto e composto mais plástico, obtiveram-se resultados semelhantes de ângulo de atrito. Para os valores de intercepto de coesão, o composto sem adição de plástico gerou o maior valor de coesão, de 6.67 kPa. Os valores de intercepto de coesão para o composto mais plástico (sem imersão em lixiviado) diminuíram.

Utilizando os valores de coesão e ângulo de atrito encontrados na execução dos ensaios de cisalhamento direto foi possível, através de modelagem, encontrar o fator de segurança para cada caso. Foi observado incremento no fator de segurança com a adição das tiras plásticas imersas no lixiviado, devido à coesão não ser nula. Com o aumento da inclinação do talude foi possível observar redução no fator de segurança, para todos os casos.

Os valores de fator de segurança, para inclinações de taludes maiores, foram abaixo do recomendado (1.5), logo, recomenda-se não utilizar inclinações menores devido ao risco de rompimento do talude.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), 2017. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D698-03**: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). West Conshohocken, PA, USA, 2003.

_____. **D6528-17**: Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Fine Grain Soils. West Conshohocken, PA, USA, 2017.

BAREITHER, C. A.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. Effects of sand composition and decomposition on the shear strength of municipal solid sand. **Journal of Geotechnical**

and Geoenvironmental Engineering, v. 138, n. 10, p. 1161-1174, 2012.

CARVALHO, A. R. et al. A influência da idade e da coleta seletiva na evolução do peso específico do resíduo no aterro sanitário de Santo André. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 23. ABES, p. 1-8, 2005.

CHUGH, A. K. On the boundary conditions in slope stability analysis. **International journal for numerical and analytical methods in geomechanics**, 27:905-926, 2003.

CORREA, C.; JUCÁ, J. F.; MOTTA, E. Análise da influência do plástico mole na resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos. **Eng Sanit Ambient**, v. 20, n. 3, p. 427-436, 2015.

COWLAND, J. W.; TANG, K. Y., GABAY, J. Density and strength properties of Hong Kong refuse. In: **Proceedings of the Fourth International Waste Management and Landfill Symposium**, Sardinia, p. 1433–1446, 1993.

- DAMIANO, E. et al. Investigation on rainwater infiltration into layered shallow covers in pyroclastic soils and its effect on slope stability. **Engineering Geology**, v. 220, p. 208-218, 2017.
- DUNCAN, J. M. State-of-the-art: Static stability and deformation analysis. **Procedures, Stability and Performance of Slopes and Embankments-II**, ASCE, Reston, v. 1, p. 222-266, 1992.
- DUPLANCIC, N. Landfill Deformation Monitoring and Stability Analysis. STP25313S. **Geotechnics of Sand Fills—Theory and Practice**. In: Landva, A., Knowles, D. (Eds.), ASTM STP 25313. West Conshohocken, PA, p. 303-314, 1990.
- EID, H. T. et al. Municipal solid sand slope failure: sand and foundation soil properties. **ASCE Journal of Geotechnical Engineering**, 126 (5), 397-407, 2000.
- GABR, M. A.; VALERO, S. N. Geotechnical properties of municipal solid waste. **Geotechnical Testing Journal**, 18 (2), 241-251, 1995.
- GAWLIK, F. et al. Effects of Soft Plastic on MSW Shear Strength. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 18, p. 5117-5124, 2013.
- GEOSTUDIO, 2012. **Geo-slope International Ltd.**, Canadá.
- GHARABAGHI, B. et al. Comparison of slope stability in two Brazilian municipal landfills. **Journal of Sand Management**, 28 (2008), p. 1509-1517, 2008.
- GOMES C.; LOPES; M. L.; OLIVEIRA, P. J. V. Municipal solid waste shear strength parameters defined through laboratorial and in situ tests. **Journal of the Air & Waste Management Association**, 63:11, 1352-1368, 2013. DOI: 10.1080/10962247.2013.813876
- GRIFFITHS, G. V.; LANE, P. A. Slope stability analysis by finite elements. **Geotechnique**, 49(3): 387-403, 1999.
- _____; MARQUEZ, R. M. Three dimensional slope stability analysis by elasto-plastic finite elements. **Geotechnique**, 57(6): 537-546, 2007.
- GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; TANCREDI, G. Contribution to a Technical Classification of MSW. In: **Proceedings Sardinia 95**, Fifth International Landfill Symposium. Cagliari, Italy, p. 703-710, 1995.
- HOUSTON, W. N. et al. In situ testing methods for dynamic properties of MSW landfills. In: **Proc. Specialty Conf. Earthquake Des. Perf. of Solid Waste Landfills**, v. 54, Geotech. Spec. Publ., ASCE, New York, p. 73-82, 1995.
- JESSBERGER, H. L.; SYLLWASSCHY, O.; KOCKEL, R. Investigation of waste body behaviour and waste structure interaction. In: **Proceedings of the Fifth International Waste management and Landfill Symposium**, Sardinia, p. 731-743, 1995.
- KARIMPOUR-FARD, M. et al. A laboratory study on the MSW mechanical behavior in triaxial apparatus. **Journal of Waste Management**, 31 (2011), p. 1807-1819, 2011.
- KAUSHAL, R. K. et al. Shear strength characteristics of municipal solid sand. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 8, n. 6, p. 1044-1053, 2017.
- KAVAZANJIAN JR., E. et al. Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis Geoenvironment 2000. **Geotechnical Special Publication**, ASCE, v. 46. p. 1126-1141, 1995.
- KOERNER, R. M.; SOONG, T.-Y. Leachate in landfills: the stability issues. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 18, n. 5, p. 293-309, 2000.
- _____; _____. Stability analyses of ten landfill failures. In: **Proc. 2nd Austrian Geotechnical Congress**, Austrian Engineering and Architects Society, Eschenbachgasse, Vienna, pp. 9–50, 1999.
- LANDVA, A. O.; CLARK, J. I. Geotechnical testing of wastefills. In: **Proceedings of the 39th Canadian Geotechnical Conference**, Ottawa, p. 371-385, 1986.
- _____; _____. Geotechnics of waste fill. In: Landva, A., Knowles, D. **Geotechnics of waste fills—Theory and practice**. (Eds.), Philadelphia: ASTM - STP 1070, 1990. p. 86-103.
- LI, X.; SHI, J. Stress-strain behaviour and shear strength of Municipal Solid Sand (MSW). **KSCE**

Journal of Civil Engineering, v. 20, n. 5, p. 1747-1758, 2016.

LIU, C. N. et al. What is an appropriate factor of safety of landfill cover slopes. **Conference proceedings: Geosynthetics**, v. 1 and 2, 1174 p. Long Beach, CA (United States), 1997.

OJURI, O. O.; ADEGOKE, P. K. Geotechnical characteristics of synthetic municipal solid sand for effective landfill design. **International journal of GEOMATE: geotechnique, construction materials and environment**, v. 9, n. 1, p. 1418-1427, 2015.

PELKEY, S. A.; VALSANGKAR, A. J.; LANDVA, A. Shear displacement dependent strength of municipal solid waste and its major constituents. **Geotechnical Testing Journal**, 24(4), 381-390, 2001.

PENG, R. et al. Back-Analyses of Landfill Instability Induced by High Water Level: Case Study of Shenzhen Landfill. **International Journal Environmental Research and Public Health**, 13(1), 126, 2016.

REDDY, K. R. et al. Geotechnical properties of fresh municipal solid sand at Orchard Hills Landfill, USA. **Sand Management**, v. 29, n. 2, p. 952-959, 2009.

REYES, A.; PARRA, D. 3D slope stability analysis by the using limit equilibrium method analysis of a mine sand dump. **Proceedings Tailings and Mine Sand**, Colorado, USA, 2014.

SHARIATMADARI, N.; ASADI, M.; KARIMPOUR-FARD, M. Investigation of fiber effect on the mechanical behavior of municipal solid sand by different shearing test apparatuses. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 14, n. 10, p. 2239-2248, 2017.

SIEGEL, R. A.; ROBERTSON, R. J.; ANDERSON, D. G. Slope stability investigations at a landfill in Southern California. In: Landva, A., Knowles, D. **Geotechnics of waste fills—Theory and practice**. (Eds.), Philadelphia: ASTM - STP 1070, 1990. p. 259-284.

SKEMPTON, A. W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. **Geotechnique**, 35(1), 3-18, 1985.

SPENCER, E. A Method of Analysis of Embankments assuming Parallel Inter-slice Forces. **Geotechnique**, v. 17 (1), p. 11-26, 1967.

STARK, Timothy D.; EID, Hisham T. Performance of three-dimensional slope stability methods in practice. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 124, n. 11, p. 1049-106 ,1998.

VILAR, O. M.; CARVALHO, M. F. Shear strength properties of municipal solid waste. In: DE MELLO, L. G., ALMEIDS, M. (Eds.), **Proceedings of the Fourth International Conference on Environmental Geotechnics**, A Balkema, Lisse, Netherland, p. 59-64, 2002.

_____; _____. Mechanical properties of municipal solid sand. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 32, n. 6, p. 438-449, 2004.

WITHIAM, J. L., et al. Prediction and performance of municipal landfill slope. In: **GeoEnvironment 2000**, v. 46. Geotechnical Special Publication, ASCE, p. 1005-1019, 1995.

ZHAO, Y. R. et al. A study of shear strength properties of municipal solid sand in Chongqing landfill, China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 21, n. 22, p. 12605-12615, 2014.