



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

INFLUÊNCIA DOS PLÁSTICOS NA ESTABILIDADE DE TALUDES EM ATERROS SANITÁRIOS

Orientanda: Anny Virgínia Souza de Lima

Orientadora: Prof^a Dr.^a Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Co-orientador: Prof. Me. Cláudio Luis de Araújo Neto.

Campina Grande, PB.

Dezembro, 2019

ANNY VIRGÍNIA SOUZA DE LIMA

**INFLUÊNCIA DOS PLÁSTICOS NA ESTABILIDADE DE TALUDES EM ATERROS
SANITÁRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado à Unidade Acadêmica de Engenharia
Civil da Universidade Federal de Campina Grande
(UFCG), como requisito para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Campina Grande, PB.

Dezembro, 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FOLHA DE APROVAÇÃO

**INFLUÊNCIA DOS PLÁSTICOS NA ESTABILIDADE DE TALUDES EM ATERROS
SANITÁRIOS**



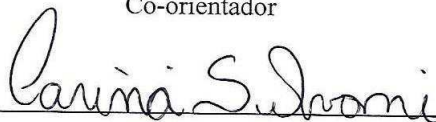
Prof^ª Dr.^a Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Orientadora



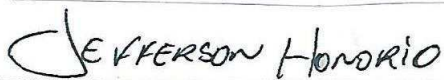
Prof. Me. Cláudio Luis de Araújo Neto

Co-orientador



Prof^ª Dr.^a Carina Silvani

Examinadora Interna



Enf, Civil Jeferson Honório Gomes da Silva

Examinador Externo

Campina Grande

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter proporcionado esta experiência em minha vida, por me dar força e mostrar os melhores caminhos.

A minha família, em especial a meu pai, Alfredo e a meu irmão, Vagner que sempre me apoiaram e incentivaram em todas as etapas da minha vida e a minha mãe (in memoriam) que deixou grandes ensinamentos e eternas saudades, bem como foi força para meu cansaço. A minha tia Vitória, que, se tornou mãe para seus sobrinhos, sempre esteve procurando o melhor para mim.

Aos meus avós Augusto (in memoriam) e Maria Júlia, que além de me educarem, não mediram esforços para concretização deste sonho, sendo meus segundos pais na terra.

Ao meu namorado Arthur por me dar apoio e amor nessa caminhada.

As minhas amigas queridas Mariana, Jucimara e Raissa, por serem pessoas maravilhosas e terem sobrevivido à faculdade junto comigo. A Thiago, por todas as vezes que acreditou em mim, dando força, apoio e carinho em todos os momentos.

A todos que compõem o GGA. O conhecimento adquirido como aluna de iniciação científica, que totalizam 3 anos de GGA, será eternizado. Obrigado por terem me recebido tão bem e me agraciado com tantas oportunidades boas. Em especial ao subgrupo de ensaios geotécnicos, onde tive oportunidade de crescer bastante e retirar ótimos amigos. Aos meus amigos Cláudio, Jefferson Honório, Renan, Jéssica, Fernanda por fazerem as atividades se tornarem menos cansativas e produtivas, e sobretudo, por estarem sempre dispostos a ajudar, seja com palavras, correções, saídas.

Aos meus orientadores, Professora Veruschka Monteiro e Professor Cláudio Araújo, pelo apoio, paciência, cooperação, amizade, compreensão, confiança, disposição e dedicação.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desse trabalho.

Muito obrigada!

RESUMO

Os plásticos moles em aterros sanitários são elementos fibrosos e exercem um efeito de reforço na resistência ao cisalhamento e à tração, caracterizando o efeito-fibra e representando a matriz de reforço. Para compreender a resistência dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em aterros sanitários deve-se levar em consideração o efeito de reforço dos materiais fibrosos, constituintes dos resíduos, já que a resistência ao cisalhamento em aterros sanitários é originada, não apenas pelo atrito entre os grãos, mas também, pelo efeito semelhante ao reforço de materiais do tipo fibras e folhas, os quais constituem a matriz fibrosa ou matriz de reforço. O objetivo desse trabalho é determinar a influência dos plásticos na estabilidade de taludes de Aterros Sanitários. Esta pesquisa foi desenvolvida em três etapas, uma etapa de campo, onde foi realizado o estudo topográfico da Célula do Aterro Sanitário, o monitoramento dos níveis de líquidos e a coleta dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), para a determinação das propriedades físicas e mecânicas dos resíduos recém-aterrados. A segunda etapa correspondeu à realização de ensaios de cisalhamento direto em amostras de resíduos em laboratório com diferentes percentuais de plásticos (0%, 7,5%, 15%), para a determinação dos parâmetros de resistência, e a terceira etapa, correspondeu a análise da estabilidade dos taludes da Célula do Aterro Sanitário. Os resultados da caracterização demonstram que dos 71% dos RSU dispostos no ASCG correspondem ao material misto, 13,2 % correspondem a categoria de plásticos. Em termos de composição volumétrica, o percentual de plásticos aumentou para 32,7% do total analisado. Quanto ao monitoramento dos níveis de líquidos dos quatro piezômetros monitorados, dois apresentaram níveis superior ao estabelecido em norma, um dentro da faixa ideal para sistemas de drenagem e um não foi possível seu monitoramento pois estava obstruído. Os níveis de líquidos monitorados apresentaram valores baixos e elevados em função da operação e do local dos piezômetros. Os resultados de resistência ao cisalhamento indicaram que com aumento do percentual de plásticos houve acréscimo da coesão, porém o ângulo de atrito diminuiu para o percentual de 15% de plástico. Nas análises de estabilidade de taludes, foi verificado que, com o aumento dos percentuais de plástico, também houve aumento do fator de segurança dentro de limites pré-estabelecidos.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos, Resistência ao cisalhamento, Fator de segurança.

ABSTRACT

Landfill plastics are fibrous elements and have a reinforcing effect on shear and tensile strength, characterizing the fiber effect and representing a reinforcement matrix. In order to understand the strength of Municipal Solid Waste (MSW) in landfills, the reinforcing effect of the fibrous materials constituting the waste should be taken into account, as shear strength in landfills is caused not only by friction between grains but mainly by the similar effect to reinforcing fiber and sheet materials, which are the components of the fibrous matrix. The objective of this research determine the influence of plastics on the stability of landfill slopes. This research was developed in three stages, a field stage, where the topographic survey of the landfill cell was performed along with the monitoring of the liquid levels and Municipal Solid Waste (MSW) collection to determine the physical and mechanical properties of the waste. The second step corresponded to the performance of direct shear tests in laboratory on waste samples with different plastics percentages (0%, 7.5%, 15%) to assess the strength parameters, and next, the slope stability analysis of the landfill's cell. The results of the demonstrated characterization that 71% of MSW do not have ASCG, adding to the mixed material, 13.2% selected in the plastics category. In terms of volumetric composition, the percentage of plastics increased to 32.7% of the total analyzed. As for monitoring the levels of use of the four monitored piezometers, two levels higher than the norm and within the ideal range for drainage systems. The shear strength results indicated that with the increase of the plastic percentage, the cohesion increased, but the friction angle decreased to the 15% plastic percentage. In the slope stability analyzes, it was found that as plastic percentages increased the safety factor also increased within predetermined limits.

Keywords: Municipal solid waste, Direct shear, Factor of safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas realizadas na pesquisa.....	21
Figura 2. Aterro Sanitário em Campina Grande.....	21
Figura 3. Municípios que depositam resíduos no Aterro Sanitário em Campina Grande.	22
Figura 4. Macrocélula do ASCG.	23
Figura 5. (a) Processo de medição de líquidos no piezômetro de Casagrande; (b) Instrumento utilizado na medição de líquidos.	23
Figura 6. Localização dos piezômetros Pz1, Pz2, Pz3, Pz4 nas células do Aterro Sanitário. ...	24
Figura 7. Localização dos pontos de coleta dos RSU no ASCG-PB.....	25
Figura 8. Quarteamento dos resíduos.	25
Figura 9. Materiais espalhados e segregação dos RSU.	26
Figura 10. Etapas de separação do material misto.....	27
Figura 11. (a) Polietileno de Alta Densidade (b) Polietileno de Baixa Densidade.	29
Figura 12. Programa GEO5.	31
Figura 13. Nível de líquidos no Piezômetro 2.	32
Figura 14. Nível de líquidos no Piezômetro 4.	32
Figura 15. Composição gravimétrica do Aterro Sanitário em Campina Grande - PB.	34
Figura 16. Composição volumétrica dos resíduos depositados no ASCG – PB.	35
Figura 17. Comportamento Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal de material misto com a) 0 %, b) 7,5 % e c) 15 % de plásticos.	36
Figura 18. Comportamento deslocamento vertical versus deslocamento horizontal de material misto com a) 0 %, b) 7,5 % e c) 15 % de plásticos.	37
Figura 19. Comportamento Tensão cisalhante versus tensão normal de material misto com a) 0 %, b) 7,5 % e c) 15 % de plásticos.	38
Figura 20. Análise de estabilidade de talude de material misto e plástico.	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Revisão dos métodos para medir o comportamento cisalhamento do RSU.....	16
Quadro 2. Resultados das análises da estabilidade do Aterro Sanitário de Campina Grande – PB, amostra de material misto com 0 %, 7,5% e 15% de plásticos.	39

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASCG	Aterro Sanitário em Campina Grande
ASTM	American Society For Testing And Materials
DGGT	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik
GDA	Geotechnik der Deponien und Altlasten
GGA	Grupo de Geotecnia Ambiental
FS	Fator de Segurança
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
PB	Paraíba
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SP	São Paulo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
2.1. Objetivo Geral	12
2.2. Objetivos Específicos	12
3. REFERENCIAL TEÓRICO	12
3.1. Propriedades dos RSU	12
3.1.1. Níveis de líquidos	12
3.1.2. Composições	14
3.1.2.1. Composição Gravimétrica	14
3.1.2.2. Composição volumétrica	14
3.1.3. Resistência ao cisalhamento	15
3.2. Análise da Estabilidade de Aterros Sanitários	17
3.2.1. Método de Fellenius	19
3.2.2. Método de Bishop	20
3.2.3. Método de Janbu	20
3.2.4. Morgenstern & Price	20
4. METODOLOGIA	20
4.1. Campo experimental	21
4.2. Determinação dos níveis de líquidos	23
4.3. Coleta e amostragem dos resíduos sólidos urbanos	24
4.4. Composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos	26
4.5. Ensaio de resistência ao cisalhamento	28
4.5.1. Amostra	29
4.5.2. Preparação das amostras e moldagem dos corpos de prova	29
4.5.3. Procedimento dos ensaios	30

4.6. Estabilidade de Taludes-Programa GEO 5.....	31
5. RESULTADOS	31
5.1. Níveis de líquidos	31
5.2. Composições gravimétrica e volumétrica	33
5.3. Resistência ao cisalhamento	36
5.4. Estabilidade de taludes	39
6. CONCLUSÕES	40

1. INTRODUÇÃO

Existem leis como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305) (BRASIL, 2010) que estabelece a não disposição de plásticos em aterros sanitários. A Lei nº 9.529 (BELO HORIZONTE, 2008), estabelece a substituição do uso de sacolas plásticas por sacolas ecológicas e a Lei nº 15.374 (SÃO PAULO, 2011), dispõe sobre a proibição da distribuição gratuita ou venda de sacolas plásticas a consumidores em todos os estabelecimentos comerciais, no município de São Paulo – SP. Leis que apresentam contradições, considerando que apenas rejeitos devem ir para o aterro sanitário, desconsiderando o papel como matriz de reforço para resistência e estabilidade de taludes.

Segundo Corrêa, Jucá e Motta (2015), a alteração do comportamento mecânico dos aterros sanitários, devido à redução da quantidade de plásticos moles aterrados, torna-se questionável, uma vez que, os plásticos moles, como elementos fibrosos constituintes dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), exercem um efeito de reforço na resistência ao cisalhamento e à tração, caracterizando o “efeito-fibra”, que representa a matriz de reforço em aterros sanitários.

Sabe-se que os RSU têm uma composição bastante heterogênea em tamanho, forma e tipo dos seus componentes. Assim, para analisar seu comportamento mecânico, esta composição é comumente dividida em duas matrizes: básica (componentes não fibrosos) e reforço (plástico, têxteis, em fibras em geral). Enquanto a primeira é responsável, predominantemente, pela resistência à compressão, a segunda é, principalmente, responsável pela tração (JESSBERGER *et al.*, 1994).

Faz-se necessário o estudo da influência da redução ou extinção dos plásticos moles em aterros sanitários, e a conseqüente diminuição dos materiais fibrosos constituintes dos RSU, os quais exercem um efeito de reforço na resistência ao cisalhamento dos resíduo. Desta forma, a variabilidade dos percentuais de plásticos influencia a estabilidade de taludes de RSU, gerando mudanças neste comportamento.

Para uma completa análise de estabilidade, deve-se levar em consideração os demais parâmetros que a massa de resíduos e solo está sujeita, como a poropressão de líquidos e gases, além de demais fatores que alteram a dinâmica dessa obra.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Determinar a influência dos plásticos moles na estabilidade de taludes de Aterros Sanitários.

2.2. Objetivos Específicos

- Determinar as composições gravimétrica e volumétrica dos resíduos sólidos urbanos depositados no Aterro Sanitário em Campina Grande - PB;
- Determinar níveis de líquidos medidos diretamente nos piezômetros da Célula no Aterro Sanitário em Campina Grande - PB para as análises de estabilidade;
- Obter parâmetros de resistência ao cisalhamento em amostras com diferentes percentuais de resíduos plásticos moles;
- Verificar a estabilidade de taludes levando em consideração a variabilidade do percentual de plásticos moles nos resíduos sólidos urbanos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Para compreensão deste trabalho, apresenta-se a seguir a revisão bibliográfica realizada durante o desenvolvimento da pesquisa. São englobados conceitos, propriedades, modelos e estudos relacionados aos resíduos sólidos urbanos e seu comportamento em aterros sanitários.

3.1. Propriedades dos RSU

3.1.1. Níveis de líquidos

Conforme Zhan *et al.* (2015), a presença de lixiviado é responsável pela formação de poropressões, podendo aumentar de maneira significativa com a formação de lixiviado e o acúmulo de gases, sendo, de fato, essencial na variação do Fator de Segurança (FS) em aterros sanitários. À medida que os fluidos, lixiviado e os gases, preenchem os poros do maciço sanitário desenvolvem poropressões na estrutura. Dessa maneira, há redução nas tensões efetivas, alterando assim, o fator de segurança do maciço, bem como sua condição de estabilidade.

Segundo Nóbrega *et al.* (2008), o monitoramento de níveis de líquidos se dá por meio de piezômetros instalados nos aterros sanitários. Uma das formas de monitoramento do nível de líquidos se dá por meio piezômetros instalados. Esses instrumentos permitem a obtenção da pressão hidráulica no ponto em que é instalado. Os piezômetros são instrumentos dos mais confiáveis e robustos, para a mensuração das subpressões ou poropressões, em barragens de terra, em virtude de sua simplicidade, do seu custo moderado e da sua durabilidade (CASTRO, 2008). Santos Júnior (2018), enfatiza diversos modelos de piezômetros para aferição de nível de líquidos, sendo exemplos desses o Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante, Piezômetro Vector e o Piezômetros de Casagrande.

Conforme Andrades (2018) as rupturas dos maciços sanitários estão associadas ao desenvolvimento excessivo de poropressões internas do maciço devido às más condições de drenagem da massa bem como a compactação do maciço, tendo como consequência, o escorregamento de milhares de metros cúbicos de resíduos. Deve-se dar atenção ainda, aos potenciais bolsões de lixiviado e gás presentes na massa de resíduos, que conferem maior heterogeneidade e comprometem a estabilidade dos maciços. Apesar da inspeção dessas características ser complexa, um maior número de piezômetros, dispostos no aterro, pode auxiliar a identificar os níveis de líquidos.

Munich e Bauer (2006) revelaram que, alguns dos maiores acidentes em aterros sanitários, acontecidos na última década, com rupturas volumosas foram ocasionadas pelo alto índice de saturação do maciço sanitário proveniente de altas precipitações e sistema de drenagens falhos ou inexistentes, pela má compactação dos RSU, dentre outros fatores. Cita-se como exemplo as catástrofes ocorridas na última década em Bandung na Indonésia em 2005 e em Manila nas Filipinas no ano 2000. Fatos semelhantes ocorreram em Aterros Sanitários, como o Aterro de Payatas, Filipinas, em julho de 2000 e no Aterro de Leuwigajah, Indonésia, em fevereiro de 2005 (MOTTA, 2012).

No Brasil, pode-se citar casos na literatura como o escorregamento do Aterro Controlado de Salvador - BA (Oliveira, 2002) e o escorregamento do Aterro Sanitário Bandeirantes, localizado no município de São Paulo (IPT, 1991). Considera-se como fator deflagrador, os altos índices pluviométricos, que ocasionaram o aumento do volume de água nas massas dos aterros proporcionando o aumento da poropressão, que afetou a sua estabilidade.

3.1.2. Composições

Os RSU, pela própria natureza, têm como principal característica a heterogeneidade, pois sua composição varia em tipo, forma e tamanho de seus componentes. A massa de resíduos depositada e compactada nos aterros se arranja em uma estrutura com fase sólida e vazios. Porém, os vazios entre os componentes sólidos podem estar preenchidos por lixiviado e/ou biogás, desta forma, na sua composição estão as fases sólida, líquida e gasosa (DE QUEIROZ MOTTA, 2011). A composição dos resíduos pode ser realizada em peso e volume sendo denominada a determinação da sua composição gravimétrica e volumétrica, respectivamente.

3.1.2.1. Composição Gravimétrica

A composição gravimétrica representa a porcentagem em peso dos componentes dos RSU em relação à amostra total. Esta composição pode variar em função do nível educacional, hábitos, atividade econômica, clima e nível de desenvolvimento da região (BOSCOV, 2008).

Segundo Araújo Neto (2016), a constituição dos RSU influencia a dinâmica dos aterros sanitários, de tal maneira que o material em maior proporção determina as características gerais do resíduo. Segundo Zekkos *et al.* (2010), a quantidade de matéria orgânica, que apresenta maior percentual em massa dos resíduos, influencia, principalmente, a estabilidade, os recalques, a geração de gás, lixiviado e o umidade de aterros sanitários.

De acordo com Boscov (2008), os RSU são geralmente compostos por: materiais putrescíveis (resíduos alimentares, resíduos de jardinagem e varrição, e demais materiais que apodrecem rapidamente), papéis e papelões, plásticos, madeiras, metais, vidros e outros (entulhos, espumas, solos, couro, borrachas, cinzas, tecidos, óleos, graxas, resíduos industriais não perigosos etc.).

3.1.2.2. Composição volumétrica

A composição volumétrica, que define o percentual dos diversos componentes presentes nos resíduos em termos de volume, pode ser realizada com resíduos soltos ou compactados (ARÁUJO NETO, 2016).

Segundo Corrêa (2013), apesar do pouco uso, este tipo de composição é de grande importância para prever o espaço físico ocupado por cada fração dos resíduos em aterros e, portanto, definir a vida útil desses aterros e realizar a avaliação do comportamento geotécnico do maciço. A fração de plásticos pode representar 20% em peso, conforme composições

gravimétricas de Araújo Neto (2016), Brito (2017) e Guedes (2018), e que pode atingir cerca de três vezes este percentual em volume. Desta forma, a retirada destes materiais dos RSU pode representar ganhos de vida útil. Por outro lado, pode afetar o comportamento geotécnico do aterro.

Assim como a composição gravimétrica, a composição volumétrica dos resíduos de um local varia em função de diferentes fatores, como o número de habitantes do município, o nível educacional da população, o poder aquisitivo e o nível de renda familiar, os hábitos e os costumes da população, as condições climáticas e sazonais e a industrialização de alimentos.

3.1.3. Resistência ao cisalhamento

Conforme Pinto (2006), a ruptura dos taludes de solos é quase sempre um fenômeno de cisalhamento. A resistência ao cisalhamento dos RSU é a máxima tensão de cisalhamento que o resíduo pode suportar sem sofrer ruptura, ou a tensão de cisalhamento no plano em que a ruptura estiver ocorrendo.

Segundo Côrrea (2013), a busca por melhor aproveitamento das áreas para implantação de aterros sanitários, função da escassez de espaço para esse aporte de obra, leva a implantar aterros cada vez mais íngremes. Tal fenômeno só é possível devido ao efeito de uma pseudocoesão advinda dos reforços das fibras. Deve-se levar em consideração que o fenômeno de cisalhamento tem a influência de duas parcelas, a resistência por atrito entre as partículas e a coesão. O atrito entre as partículas nos RSU se assemelha ao que ocorre nos solos, entretanto nos RSU a parcela correspondente a coesão, que nos solos é um fenômeno de atração química entre as partículas, é ocasionada pela presença de elementos fibrosos, como o plástico mole, da classe dos termoplásticos, que provoca uma pseudocoesão.

O modelo apresentado por Jessberger *et al.* (1994), König & Jessberger (1997) e Fucale (2005) representam os RSU como material composto por duas frações, constituído de: uma matriz básica, compreendida pelas partículas granulares, e outra matriz de reforço contendo os materiais fibrosos dos resíduos sólidos (plásticos, têxteis).

De acordo com Kölsch (1993, 1995, 1996) e Yamawaki *et al.* (2015) os materiais fibrosos são responsáveis pela resistência à tração. Segundo Yamawaki *et al.* (2017), as características mecânicas variam consideravelmente com a presença de materiais plásticos e fibrosos. A resistência a tração, influenciada pela presença de plástico, é fator favorável à capacidade de suporte de um aterro de RSU.

Segundo Silva (2014), como todas as demais características inerentes aos RSU, os parâmetros de resistência ao cisalhamento também sofrem influência de diferentes fatores, o que torna a obtenção desses dados desafiadora. Diversos estudos vêm sendo realizados para avaliar a resistência ao cisalhamento dos RSU, dentre esses pode-se citar os estudos de Côrrea (2013), Shariatmadari, Sadeghpour e Razaghian (2014), Brito (2017), Ramaiah, Ramana e Datta (2017) e Vieira (2018). Semelhante às demais propriedades dos RSU, a resistência ao cisalhamento é específica para cada local e composição, além de ser influenciada pela idade, tamanho das partículas, peso específico, preparação da amostra e método de ensaio. O Quadro 01 apresenta um resumo dos métodos mais usuais para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, bem como suas vantagens e desvantagens.

Quadro 1. Revisão dos métodos para determinação da resistência ao cisalhamento dos RSU.

TIPO	MÉTODO DE MEDIDA	COMENTÁRIOS	REFERÊNCIAS
Campo	Retroanálise de rupturas de talude	Informação adequada raramente disponível (poro-pressão, forma e posição da superfície de ruptura)	Koerner e Soong (2000)
	Retroanálise de experimentos de talude cortado	Grandes deformações observadas, mas sem rupturas	Singh e Murphy (1990), Cowland et al. (1993)
	Retroanálise de taludes estáveis existentes	A variável composição do RSU significa que a experiência passada não é um caminho para desempenho futuro	Gotteland et al. (2002)
	Ensaio de cisalhamento direto de campo	Dificuldades de execução e os resultados são relacionados a baixos níveis de tensão	Jessberger e Kockel (1993)
Laboratório	Compressão triaxial	Amostras deformadas, resistências ao cisalhamento de pico não obtidas devido à compressão e densificação da amostra	Jessberger (1994), Grisolia et al. (1995b)

Cisalhamento direto	Exigência de grandes equipamentos, amostras deformadas e grandes deslocamentos exigidos para mobilizar a resistência ao cisalhamento de pico	Kolsch (1995)., Gotteland et al. (2001)
Cisalhamento simples	Exigência de grandes equipamentos, amostras deformadas e informação útil na rigidez cisalhante (usado em análises sísmicas)	Kavazanjian et al. (1999)

Fonte: Dixon & Jones (2005); Andrades (2018).

Shariatmadari *et al.* (2011) encontraram os valores de coesão variando entre 10 a 21 kPa e ângulo de atrito entre 7° a 28° para resíduos novos em um aterro localizado no Irã, utilizando tensões normais de 20, 50, 100 e 200 kPa, enquanto De Queiroz Motta (2011), encontrou $c = 34$ kPa e $\Phi = 28^\circ$ para resíduos frescos dispostos na Central de Tratamento de Resíduos (CTR), localizado em Igarassu – PE, utilizando tensões normais de 25 a 100 kPa.

Alidoust, Keramati e Shariatmadari (2018) ainda mencionam, a influência do plástico como material de reforço merece questionamento, de modo que, ao passo que se aumenta a rigidez da amostra com um maior percentual de plásticos resulta em mudanças na composição, que são opostas a sua condição de reforço. Os ensaios incapazes de criar uma tensão crítica para atividade das fibras comportamento atribuído a baixa taxa de deformação, ou seja, os ensaios não conseguem solicitar essa carga crítica para o então conhecimento do comportamento dessas fibras como materiais de reforço.

Devido à grande quantidade de materiais fibrosos presentes nos RSU, o material que mais se aproxima desse é o solo reforçado. Ao reforçar um solo, deixando-o mais resistente à tração, obtém-se um aumento na resistência ao cisalhamento. Esse procedimento de reforço de solo vem sendo bastante empregado nas obras de engenharia (SILVA, 2014).

3.2. Análise da Estabilidade de Aterros Sanitários

A estabilidade do aterro é função de diferentes fatores, incluindo a pressão da água dos poros, geometria, composição dos resíduos e compactação (Stark e Huvaj-Sarihan 2009). Cada um desses fatores, ou uma combinação desses fatores, pode levar à falha na condição de estabilidade atingindo condições críticas (JAHANFAR, 2017).

Para Gawlik (2014), a estabilidade de um aterro depende da resistência ao cisalhamento e de seus elementos constituintes. Em relação aos materiais que são depositados, diversos fatores influenciam nas características de resistência, como por exemplo, a composição, a idade, a pressão confinante, detalhes de operação do aterro (compactação, geração de lixiviado, a drenagem de gás e lixiviado), a existência de camadas de solo de cobertura; além da inclinação que foi dada ao aterro, o que por sua vez, regula a capacidade de deposição dos resíduos.

Assim, surge a necessidade de definir a condição de estabilidade a partir da obtenção dos parâmetros que tem influência direta neste fator. As análises de estabilidade podem ser realizadas com base em métodos probabilísticos e determinísticos, onde o tipo de análise adotada é dependente da escala de trabalho, da disponibilidade de tempo, dados e, sobretudo, da disponibilidade de recursos financeiros (RÉMEDIO, 2014). O objetivo da análise de estabilidade é avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento da massa de solo ou resíduos presentes em talude natural ou construído.

A análise probabilística de estabilidade de taludes considera a variação dos parâmetros geotécnicos envolvidos, ao contrário da análise determinística, que adota um valor médio para cada parâmetro de resistência do solo. Além disso, por meio do enfoque probabilístico é possível calcular a probabilidade de ruptura e a confiabilidade do talude, que servem como dados auxiliares na execução de projetos geotécnicos. Os métodos probabilísticos utilizam algum método determinístico em seus cálculos, que influencia o resultado da análise (TONUS, 2009). São poucos os autores que relatam o uso da abordagem probabilista nos seus estudos, mas pode-se citar os estudos de Babu *et al.* (2014), Srivasatava e Reddy (2012).

Jahanfar (2017), realizou estudo com base em abordagem probabilística para a estabilidade de taludes, atribuindo distribuições de probabilidade às propriedades dos resíduos. Assim, por meio de declives de resíduos falhados, atribuiu-se distribuições de probabilidade para a densidade, ângulo de atrito e coesão dos RSU com base no método de disposição (aterro ou lixão) e na composição do material residual (materiais fibrosos ou resíduos alimentares).

A análise determinística de estabilidade de taludes divide-se em dois grandes grupos: métodos baseados em análise de deslocamentos e métodos baseados em estado de equilíbrio limite. Os métodos de equilíbrio limite, utilizados para a análise de estabilidade de taludes, se baseiam na hipótese de haver equilíbrio em uma massa de solo, tomada como corpo rígido, na iminência de entrar em processo de escorregamento. Esses métodos são amplamente utilizados, devido à facilidade de aplicação e a experiência acumulada ao longo dos anos, bem como da utilização de diversas ferramentas matemáticas (TONUS, 2009).

Conforme Remédio (2014), as análises de estabilidade de taludes determinísticas são realizadas com base no fator de segurança (FS), que representa a relação entre as tensões cisalhantes mobilizadas e a resistência ao cisalhamento. Assim, o fator de segurança pode ser dado pela Equação 1.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (1)$$

FS = Fator de segurança;

τ_f = Resistência ao cisalhamento;

τ_d = Tensões cisalhantes desenvolvidas ao longo da superfície de ruptura.

Nesta relação, valores de FS maiores que 1 indicam condições de estabilidade, valores iguais a 1 representam o limite da estabilidade e valores menores que 1 não possuem significado físico (SCHULER, 2010). O coeficiente de segurança usual em Engenharia Geotécnica, é da ordem de 1,5 (BOSCOV, 2008).

A norma NBR 11.682 (ABNT 2009) trata da estabilidade de taludes de solos incluindo as condições para estudo, projeto, execução, controle e observação de obras de estabilização. Nesta norma são definidos valores de fator de segurança mínimos a serem adotados em projetos de taludes e encostas, de acordo com o grau de segurança definido para o local de implementação da obra. Define-se fator de segurança mínimo de 1,50 para projetos executados em locais com grau de segurança alto, onde se enquadra as obras dos maciços sanitários.

A partir do conceito de fator de segurança e equilíbrio limite, foram desenvolvidas diversas técnicas analíticas para determinação do fator de segurança, entre as quais, os métodos baseados no equilíbrio limite, que assumem o rompimento do maciço por uma superfície de ruptura circular, poligonal ou de outra geometria qualquer GERSCOVICH (2012). Esses métodos de análise utilizam-se da geotecnia clássica para determinar o coeficiente de segurança, partindo dos modelos propostos por diversos autores, dentre esses Fellenius (1936), Bishop (1955), Janbu (1954) e Morgenstern & Price (1965).

3.2.1. Método de Fellenius

O método de análise de estabilidade proposto por Fellenius (1936), originalmente para estudar solos saturados, foi ampliado para outros solos e em condições de análise em tensões efetivas. Conforme Strauss (1998) no método são utilizadas fatias para determinar a distribuição da tensão normal na superfície de ruptura, importante para a análise com tensões efetivas. O

método satisfaz somente o equilíbrio de momentos, supondo que a resultante das forças entre fatias é paralela à base. Devido a isto, tem seu fator de segurança subestimado, podendo errar em até 60% segundo Whitman & Bailey (1967).

3.2.2. Método de Bishop

O método de Bishop (1955) foi desenvolvido originalmente para uma superfície de ruptura circular, mas pode ser adaptado para superfícies não circulares. A hipótese admitida é que as forças entre fatias são nulas. Conforme Strauss (1998), a força normal atua no centro da base da fatia e é derivada da soma de forças verticais. Não há satisfação do equilíbrio de forças horizontais.

3.2.3. Método de Janbu

Janbu (1954), desenvolveu o primeiro método para análise de estabilidade de taludes considerando superfícies de ruptura não circulares (podendo ser utilizado em superfícies circulares). Uma versão simplificada deste método foi também desenvolvida, considerando que as forças cisalhantes entre fatias são nulas, obtendo uma força total normal (P) equivalente à encontrada por Bishop Simplificado.

3.2.4. Morgenstern & Price

Método desenvolvido por Morgenstern & Price (1965), considera que as forças entre as fatias podem ter direções variáveis não sendo necessariamente paralelas. Também é considerado um “método exato”, porém enquanto o método de Spencer considera o equilíbrio de momento total, Morgenstern & Price considera o equilíbrio de momentos individualmente. Pode ser utilizado em superfícies de ruptura circular ou não circular.

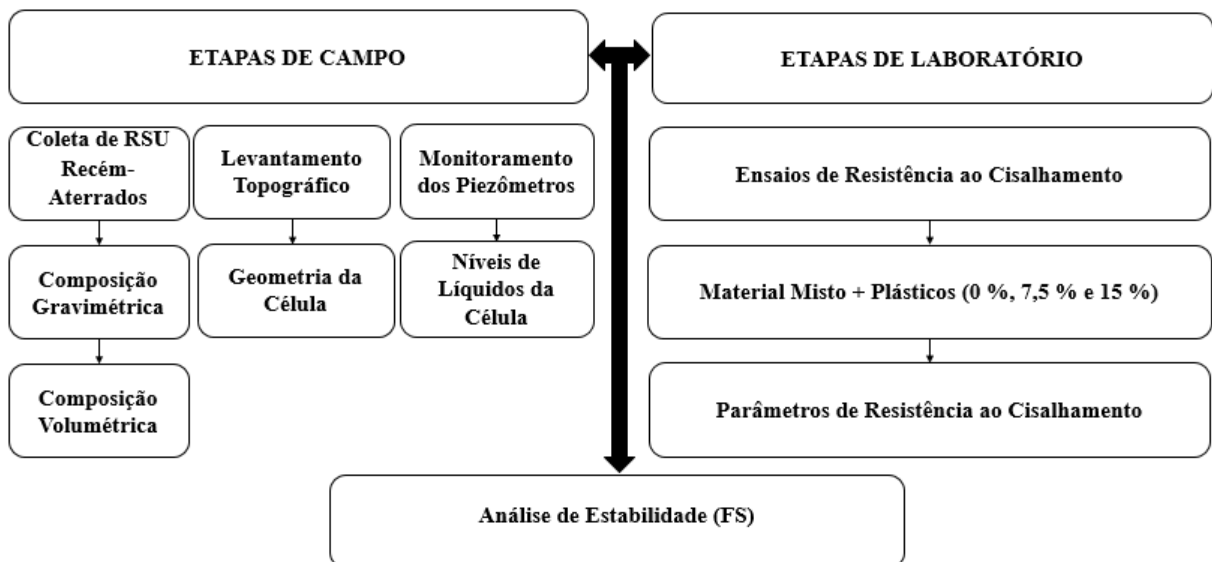
4. METODOLOGIA

A pesquisa é parte do projeto de tese do aluno de doutorado Cláudio Luís de Araújo Neto e da dissertação de mestrado de Jeferson Honório Gomes da Silva, alunos do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFCG.

Esta pesquisa foi desenvolvida em três etapas, uma etapa de campo, sendo realizado estudo topográfico, monitoramento dos níveis de líquidos em piezômetros, e coleta de RSU recém-aterrados, na Célula do Aterro Sanitário, para determinação de propriedades físicas e

mecânicas. A segunda etapa correspondeu na realização de experimentos em laboratório, sendo realizados ensaios de resistência ao cisalhamento. A terceira etapa, correspondeu à utilização de um software, sendo utilizados os modelos de estabilidade de taludes da geotecnia clássica para determinação do fator de segurança, como representado na Figura 1.

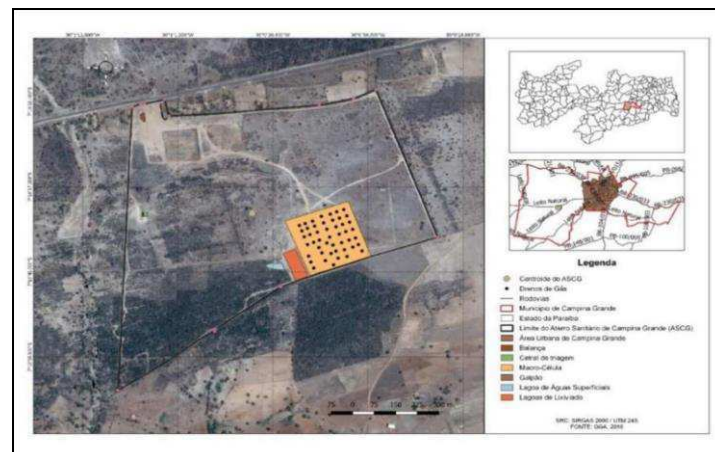
Figura 1. Etapas realizadas na pesquisa



4.1. Campo experimental

A primeira etapa da pesquisa foi desenvolvida no Aterro Sanitário em Campina Grande - PB (ASCG), localizado em uma região semiárida, no sítio Logradouro II, distrito de Campina Grande-PB as margens da PB-138, Km 10. O ASCG consiste em um empreendimento privado administrado pela ECOSOLO - Gestão Ambiental de Resíduos LTDA (Figura 2).

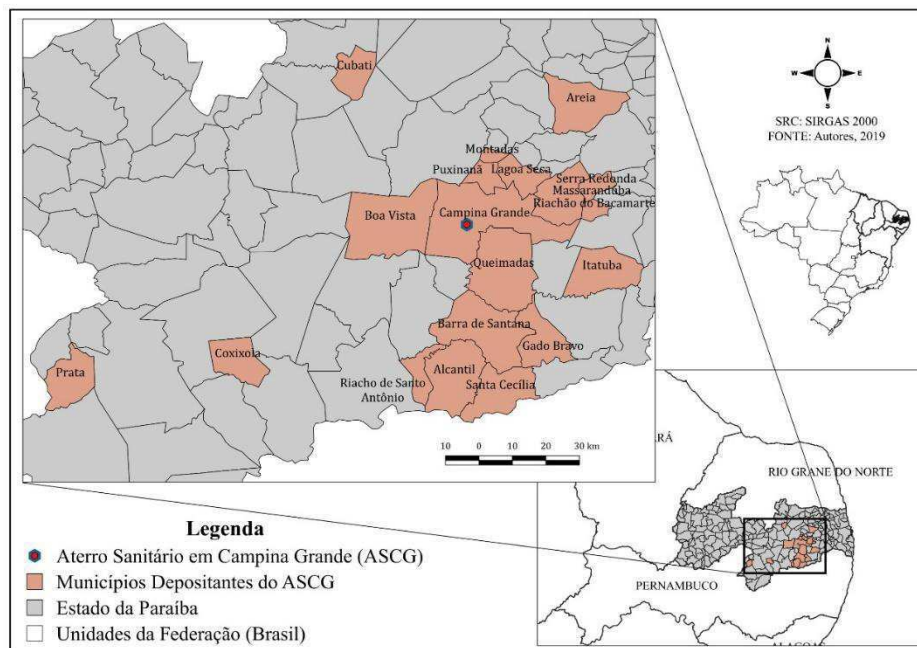
Figura 2. Aterro Sanitário em Campina Grande



Fonte: GGA (2018)

O ASCG tem previsão de vida útil de 25 anos, ocupa uma área total de 64 ha, sendo 40 ha destinados à disposição de Resíduos Sólidos Urbanos e recebe resíduos provenientes dos municípios de Campina Grande, Lagoa Seca, Montadas, Boa Vista, Puxinanã, Barra de Santana, Gado Bravo, Itatuba, Santa Cecília, Alcantil, Cubati, Coxixola, Prata, Areia, Serra Redonda, Massaranduba, Riachão de Bacamarte, Queimadas e Riacho de Santo Antônio, Figura 2, sendo todos localizados no Estado da Paraíba (Figura 3).

Figura 3. Municípios que depositam resíduos no Aterro Sanitário em Campina Grande.



Fonte: GGA (2019)

Desde o início da operação do ASCG, julho de 2015, até o presente momento, foram implantadas 4 células, denominadas de células 1 (C1), 2 (C2), 3 (C3) e 4 (C4). Além disso, foram também dispostos RSU entre as células 1 e 3 (C1+C3), e, atualmente, foram depositados RSU recém-aterrados entre as células 2 e 4 (C2+C4), células 3 e 4 (C3+C4) e células 1 e 2 (C1+C2), com o intuito de unificar as quatro Células, formando uma única Célula com dimensões de 210x210x25 (comprimento, largura e altura total), denominada de Macro Célula.

O ASCG foi projetado para receber 350 toneladas de RSU por dia (tRSU/dia), porém, está recebendo cerca de 500 tRSU/dia. Nessa Macro célula (Figura 4) foi realizado o levantamento topográfico, determinação dos níveis de líquidos e coleta de resíduos recém-aterrados para realização da composição gravimétrica e volumétrica, além dos ensaios laboratoriais e utilização de um software para determinação do fator de segurança.

Figura 4. Macrocélula do ASCG.



4.2. Determinação dos níveis de líquidos

O monitoramento dos níveis de líquidos foi realizado semanalmente em Piezômetros de Casagrande, confeccionados em manilha de concreto, com um filtro de 1 m de altura, diâmetro interno de 0,28 m e diâmetro externo de 0,37m, onde a variação dos líquidos, é verificada com auxílio de um sensor que foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Geotecnia Ambiental (GGA) da UFCG. Este equipamento, possui um fio graduado que, ao entrar em contato com o lixiviado, fecha o circuito, emite um sinal luminoso e sonoro, permitindo a obtenção da altura da lâmina de líquidos (Figura 5).

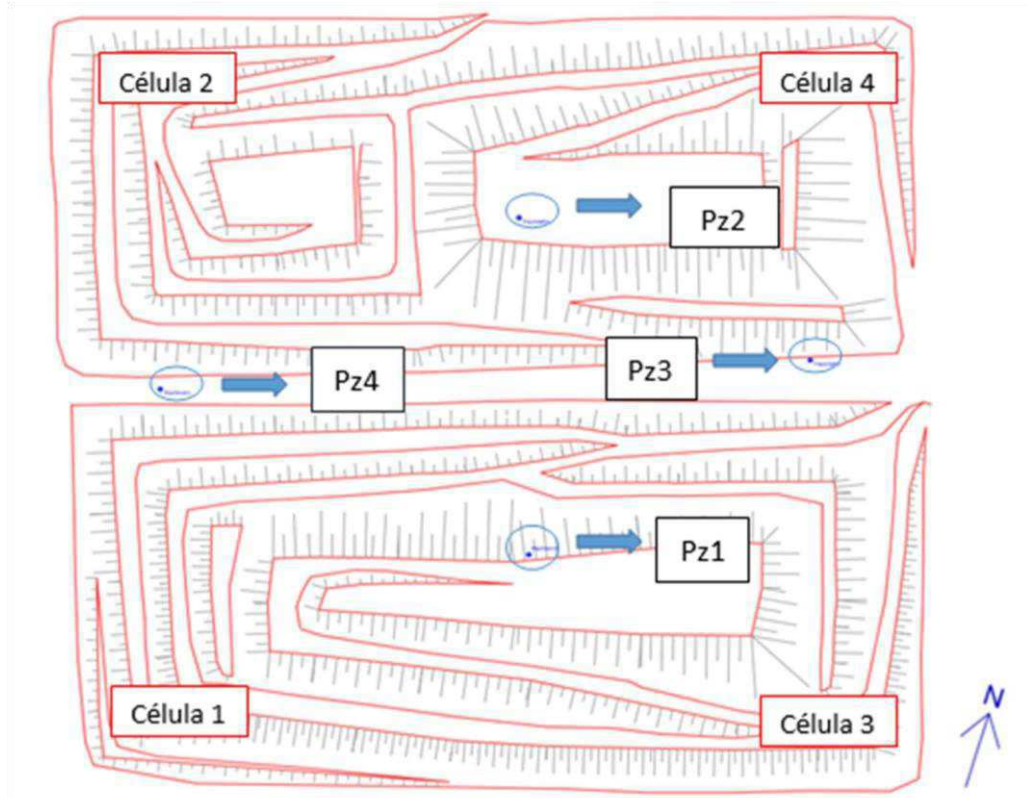
Figura 5. (a) Processo de medição de líquidos no piezômetro de Casagrande; (b) Instrumento utilizado na medição de líquidos.



Fonte: GGA (2018)

A medição do nível de líquidos foi realizada em 4 piezômetros denominado de Pz1, Pz2, Pz3 e Pz4, que foram instalados nas Célula 1+3, Célula 2+4, Célula 3+4 e Célula 1+2, respectivamente (Figura 6).

Figura 6. Localização dos piezômetros Pz1, Pz2, Pz3, Pz4 nas células do Aterro Sanitário.



Fonte: GGA (2018)

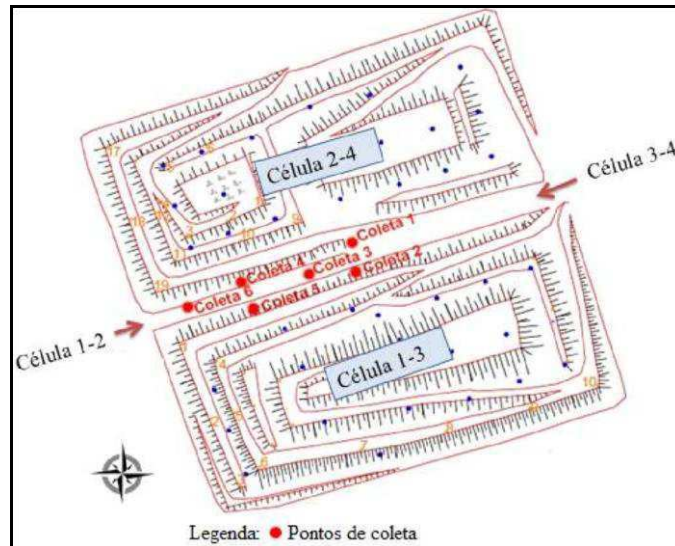
4.3. Coleta e amostragem dos resíduos sólidos urbanos

Os RSU foram coletados no dia 22 de maio de 2018, no Aterro Sanitário em Campina Grande – PB seguindo um planejamento estatístico para obter uma amostra que expresse as características dos resíduos depositados pelos 11 municípios na época da coleta, seguindo e respeitando as proporcionalidades e, obtendo-se uma amostra representativa, de acordo com a NBR 10007 (ABNT, 2004). Ressalta-se que os materiais coletados representam os RSU dispostos no ASCG no período de uma semana, garantindo a disposição de resíduos de todos os municípios, pois esses possuem dias pré-determinados para depositar seus resíduos no referido aterro durante cada semana.

Para esta pesquisa foram coletadas seis amostras, referente a seis pontos de coleta, de resíduos recém-aterrados no local de disposição do ASCG, Célula 1-2 e Célula 3-4 (Figura 7).

O início da operação da Célula 1-2 e da Célula 3-4 foi em Maio de 2018 e Junho de 2018 respectivamente. Para conseguir uma amostra representativa da massa de resíduos, foram realizados seis pontos de coleta, estando esses pontos equidistantes e representando toda a área de disposição dos materiais.

Figura 7. Localização dos pontos de coleta dos RSU no ASCG-PB.



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Adaptando a metodologia de Brito (2017), em cada ponto foi realizado uma escavação com cerca de 2 metros de profundidade, sendo o primeiro metro descartado, pois compreende a camada intermediária de cobertura do ASCG, e no metro subsequente coletou-se, aproximadamente 1 ton. de resíduos depositados no aterro sanitário, totalizando uma amostra de aproximadamente 6 ton.. Após a coleta, os resíduos foram pesados e destinados para homogeneização e quarteamento (Figura 8).

Figura 8. Quarteamento dos resíduos.



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

4.4. Composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos

Para a segregação dos RSU (Figura 9), os resíduos foram classificados de acordo com adaptações da norma alemã GDA Empfehlungen E1-7 (DGGT, 1994), constituindo nos seguintes grupos: plástico, matéria orgânica, vidro, metal, papel, papelão, têxteis sanitários, têxteis e couro, madeira, compósito (materiais constituídos pela junção de mais de um tipo de material) e material misto.

O material misto é definido como a parcela de amostra de difícil identificação e que não se enquadra em nenhuma categoria, sendo basicamente uma mistura de solo e material orgânico não identificados, apresentando quatro divisões: partículas com dimensões >40 mm, partículas com dimensões <40 mm e >20 mm, <20 mm e >8 mm e <8 mm. Para segregar o material misto nessas quatro categorias, foram utilizadas peneiras com malhas de 38,0 mm, 19,1 mm e 7,0 mm.

Figura 9. Materiais espalhados e segregação dos RSU.



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Após a pesagem, foi realizado um novo quarteamento, com o intuito de minimizar a quantidade de material misto a ser trabalhado. O material final foi pesado e passado nas peneiras de 38 mm, 19,1 mm e 7 mm, respectivamente. Essas etapas estão apresentadas na Figura 10.

Figura 10. Etapas de separação do material misto.



(a) Quarteamento do material misto; (b) Coleta do material do topo, das laterais e do centro da pilha; (c) Pesagem do material; (d) Peneiramento do material. Fonte: GGA (2018).

Para determinar o percentual de cada componente para a composição gravimétrica dos RSU por meio da determinação da massa de cada elemento em relação à massa total, utiliza-se a Equação 2.

$$CG = \frac{P_c}{P_t} \quad (2)$$

Sendo: CG = Composição gravimétrica (%);

P_c = massa de cada fração segregada (kg);

P = massa total dos resíduos destinados a composição gravimétrica (kg).

Após a realização da gravimetria, realizou-se a composição volumétrica, determinada conforme a Equação 3.

$$V = \frac{\pi h(R + Rr + r)}{3} \quad (3)$$

Sendo: V = volume dos resíduos (m^3);

h = altura encontrada (m);

R = raio maior (m);

r = raio menor (m).

Realizadas as composições gravimétrica e volumétrica, os resíduos foram espalhados para secagem ao ar durante 15 dias, com o intuito de facilitar o manuseio dos materiais. Após a secagem, os RSU foram dispostos em recipientes e encaminhados para Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) para a preparação das amostras para os ensaios de cisalhamento direto.

4.5. Ensaio de resistência ao cisalhamento

Como não existe nenhuma metodologia específica para ensaio de cisalhamento direto com RSU, utilizou-se a metodologia clássica da mecânica dos solos, baseada no critério de ruptura de Mohr Coulomb e na D3080 (ASTM, 2003). Para avaliar a contribuição dos plásticos na resistência dos RSU a partir de ensaios de cisalhamento direto, foi criado um modelo que simulasse a massa de resíduo fresco misturada aleatoriamente com plástico em diferentes percentagens, definidas de forma a englobar os percentuais de fibras encontrados na maioria dos aterros brasileiros. As amostras foram preparadas com base nos dados de composições gravimétricas de diversos aterros brasileiros e internacionais, assim como publicados por Alcântara (2007), Araújo Neto (2016), Guedes (2018) e Brito (2017).

Conforme Jessberger et al. (1994), König & Jessberger (1997) e Fucale (2005) a parte sólida da massa dos RSU pode ser representada como um material composto, constituído de duas componentes: uma matriz básica, compreendida pelas partículas granulares fina à média, e outra matriz de reforço, contendo os materiais fibrosos dos resíduos sólidos (plásticos, têxteis, fibras).

Dessa forma, com a finalidade de compor a matriz básica do experimento, foi utilizado material misto, obtido também na composição gravimétrica já mencionada, para simular as partículas sólidas da massa de resíduos. O material misto representa a parcela de amostra da composição gravimétrica de difícil identificação e que não se encaixaram em nenhuma categoria, sendo basicamente uma mistura de solo e material orgânico não identificado, correspondendo ainda a partículas com dimensões < 7mm. Para compor a matriz de reforço foi utilizado plásticos moles, da classe dos termoplásticos, em diferentes proporções.

Portanto, o ensaio de resistência ao cisalhamento foi realizado a partir de corpos de prova moldados com a composição de material misto do Aterro Sanitário e diferentes percentuais de plásticos moles com teores de 0%, 7,5 % e 15%. Os teores de plásticos foram baseados em dados de caracterizações gravimétricas de diversas cidades brasileiras e internacionais.

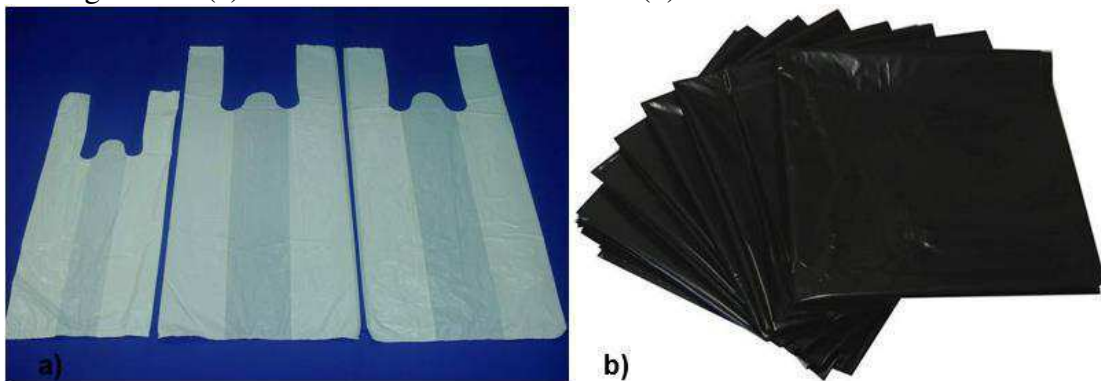
4.5.1. Amostra

Para avaliar a contribuição dos plásticos moles na resistência dos RSU, a partir de ensaios de cisalhamento direto, foi criado um modelo que simulasse a massa de resíduo misturada aleatoriamente com plástico mole em diferentes percentagens encontradas na literatura (0%, 7,5% e 15%). As amostras foram preparadas com base nos dados de composição gravimétrica dos RSU publicados por Alcântara (2007), Araújo Neto (2016), Brito (2017) e Vieira (2018) que determinou os percentuais para os diferentes tipos de plásticos.

Segundo Côrrea (2013), os polímeros encontrados nos aterros sanitários são basicamente da classe dos termoplásticos (plásticos moles: polietileno de alta densidade - PEAD e polietileno de baixa densidade - PEBD).

Dessa forma, os materiais utilizados neste estudo foram o polietileno de alta densidade – PEAD (Figura 11(a) e o polietileno de baixa densidade – PEBD (Figura 11(b), correspondentes aos termoplásticos do grupo de plástico mole. O PEAD foi obtido a partir de sacolas plásticas distribuídas em supermercado, enquanto o PEBD foi adquirido basicamente de sacolas de resíduos.

Figura 11. (a) Polietileno de Alta Densidade (b) Polietileno de Baixa Densidade.



Com a finalidade de compor a matriz básica do experimento, foi utilizado o material misto, material proveniente da composição. Desta forma, ao misturar o material misto com o reforço dos plásticos, estaria simulando os resíduos, correspondendo respectivamente, a matriz básica e a matriz de reforço.

4.5.2. Preparação das amostras e moldagem dos corpos de prova

A preparação das amostras para realização do ensaio de cisalhamento direto obedeceu às recomendações da D3080 (ASTM, 2003) que determina o tamanho máximo das partículas

das amostras, indicando valores mínimos de comprimento das caixas de 12 vezes o tamanho da maior partícula dos resíduos.

A moldagem dos corpos de prova das amostras foi realizada em três etapas:

1. Preparação das amostras levando em consideração as dimensões da caixa cisalhante, que é de 60 x 60 x 38 mm com um volume de 136800 mm³. As amostras dos resíduos, que se comportam como fibras (plásticos), foram cortadas nas dimensões de 40 mm x 10 mm, enquanto que os resíduos que se comportam como partícula, representados pelo material misto (dimensões < 7mm) foram homogeneizado, com o intuito de facilitar a moldagem do corpo de prova.

2. Determinação da quantidade de resíduos para preencher a caixa de cisalhamento, de acordo com a Equação 4. Foi levado em consideração o peso específico médio dos resíduos depositados nos aterros brasileiros, que segundo Boscov (2008), corresponde a 1 kgf/m³.

$$P_m = Vol. da cx. \times M. esp. \times \% do material \quad (4)$$

Sendo: P_m = peso de cada material (kg)

$Vol. da cx.$ = volume da caixa de cisalhamento direto (m³);

$M. esp.$ = massa específica dos resíduos (kgf/m³);

$\% do material$ = porcentagem de cada material (%).

Para a amostra de 0,0% de plástico foi utilizado um peso específico de a 1,3kgf/m³, em virtude de incompatibilidade de volume da caixa cisalhante.

3. Compactação da amostra, deixando-a rente à superfície da caixa. Com o auxílio de uma prensa hidráulica manual foi realizada a correção de área da caixa para os cálculos de tensão cisalhante e tensão normal de acordo com a norma ASTM D3080 (2003).

4.5.3. Procedimento dos ensaios

O equipamento utilizado para o ensaio de cisalhamento direto foi a prensa de cisalhamento direto produzido pela ELE, com sistema de carga confinante por meio de pesos em pendural. Nas leituras dos deslocamentos verticais e horizontais foram utilizados extensômetros com sensibilidade de 0,0005 polegadas e 0,0001 polegadas da marca ELE. A força horizontal foi determinada a partir de um anel dinamométrico com constante de 0,154 kgf/div e número máximo de divisões de 1200 div, resultando em uma capacidade de 184,8 kgf. Nesse ensaio foi adotado o tempo de adensamento para a estabilização das tensões normais de

5 minutos, considerando a aplicação da carga de 5 kPa. As leituras foram feitas em função da deformação, sendo registrado os deslocamentos horizontais e verticais. Os ensaios foram realizados em três tensões normais (50, 150 e 300 kPa) com corpos de prova moldados para cada tensão. Os ensaios foram realizados com percentuais de resíduos plásticos moles de 0%, 7,5%, 15%.

4.6. Estabilidade de Taludes-Programa GEO 5

Como ferramenta para a análise de estabilidade utilizou-se o programa computacional GEO5, em sua versão gratuita 2019 (demo), produzido pela FINE Ltda. (Figura 12).

Figura 12. Programa GEO5.



GEO5 utiliza a teoria do Equilíbrio Limite, sendo escolhido o modelo de Morgenstern & Price, para determinar o Fator de Segurança (FS) de taludes em solos e rochas, já consagrado na literatura para análise de estabilidade. Porém, poucos estudos relatam a utilização de software para a análise da estabilidade em aterros sanitários.

5. RESULTADOS

5.1. Níveis de líquidos

Segundo a NBR 13896 (ABNT, 1997) os sistemas de drenagem para a coleta e remoção dos líquidos no interior da Célula devem ser dimensionados para evitar a formação de uma lâmina superior a 0,30 m sobre a camada de impermeabilização da base.

Durante o período de monitoramento de níveis de líquidos, maio de 2018 a novembro 2018, no piezômetro 1 não foi possível determinar os níveis de líquidos pois durante o período monitorado constatou-se que havia obstrução desse piezômetro. Já no piezômetro 3 não se identificou níveis de líquidos superiores a 0,10 m não ultrapassando o estabelecido pela NBR 13896 (ABNT, 1997). Nos piezômetros 2 e 4 os níveis de líquidos ultrapassaram o estabelecido, conforme ilustra as Figuras 13 e 14.

No piezômetro 3, os baixos níveis de líquidos estão associados ao aterro monitorado está localizado no semiárido nordestino, sobretudo, na área onde esse piezômetro está localizado não está ocorrendo processo de operação (disposição de resíduos recente), bem como recirculação de lixiviado, sendo natural o baixo nível de líquido. Alves (2012) e Araújo Neto (2016) também não detectaram nível de lixiviado no sistema de monitoramento de uma célula experimental com RSU da cidade Campina Grande-PB. Os reduzidos índices pluviométricos da região em estudo, associados à execução de camadas de cobertura de solo compactado de baixa permeabilidade à água (na ordem de 10^{-8} m.s⁻¹), reduz significativamente a quantidade de líquidos que entram no sistema e, conseqüentemente, a geração de lixiviado (GUEDES, 2018).

Figura 13. Nível de líquidos no Piezômetro 2.

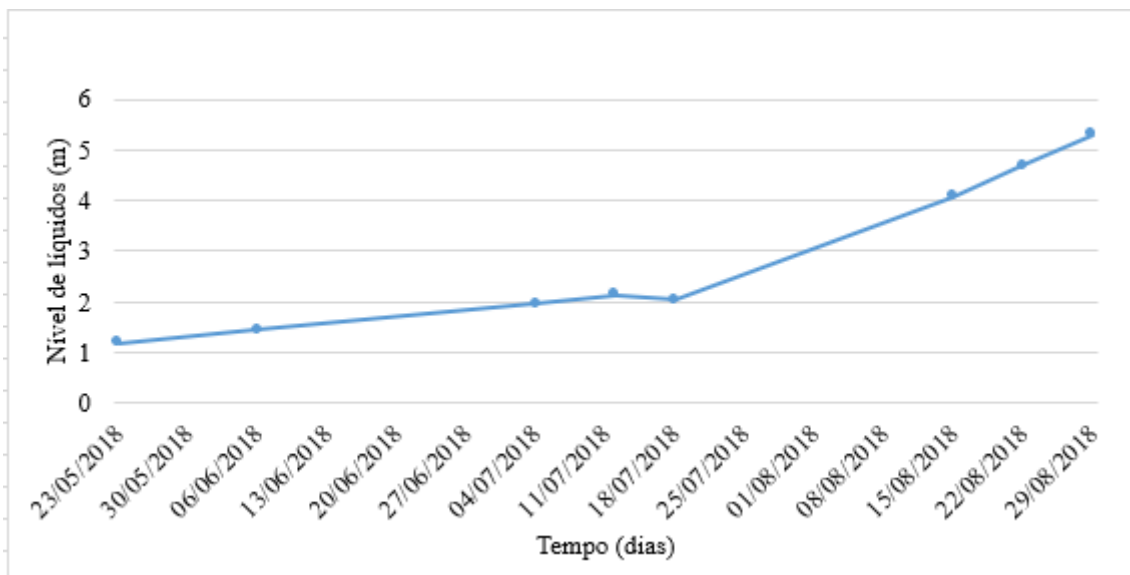
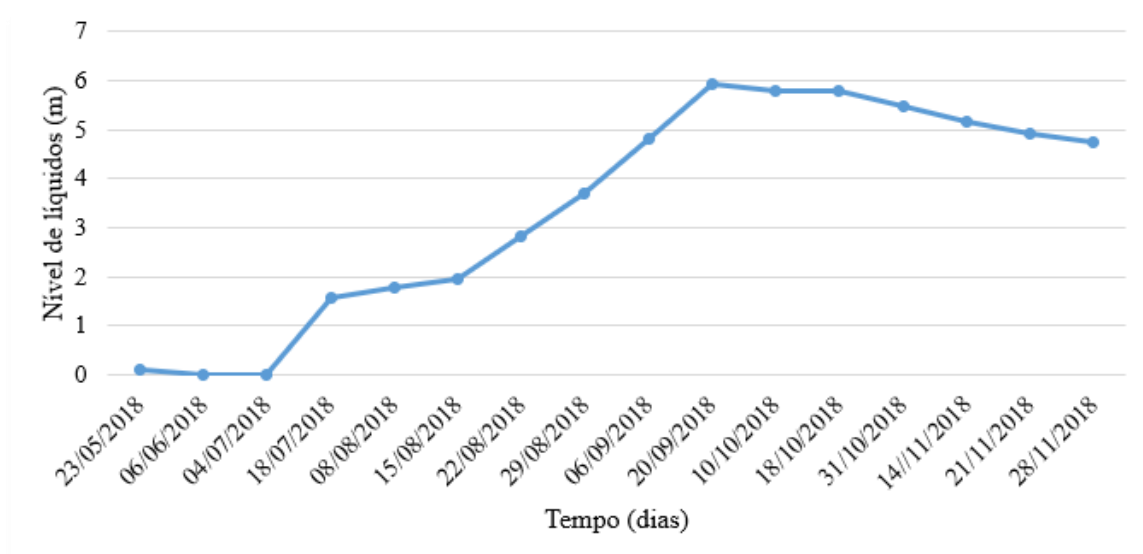


Figura 14. Nível de líquidos no Piezômetro 4.



Segundo Gurjão *et al.* (2018), os elevados níveis de líquidos monitorados nos piezômetros 2 e 4 podem estar associados ao processo de recirculação de lixiviado na Célula do ASCG. Além disso, a região onde os piezômetros estão instalados encontram-se na fase de disposição de resíduos, o que favorece uma maior geração de lixiviado e, conseqüentemente, uma lâmina de líquidos maior. Além do mais, a eventual presença de fissuras na camada de cobertura de solo compactado na Célula ocasionadas por erosão facilitam a percolação de líquidos no interior do aterro. Outros fatores podem estar associados ao elevado nível de líquidos presente no aterro, a exemplo da formação de bolsões de água.

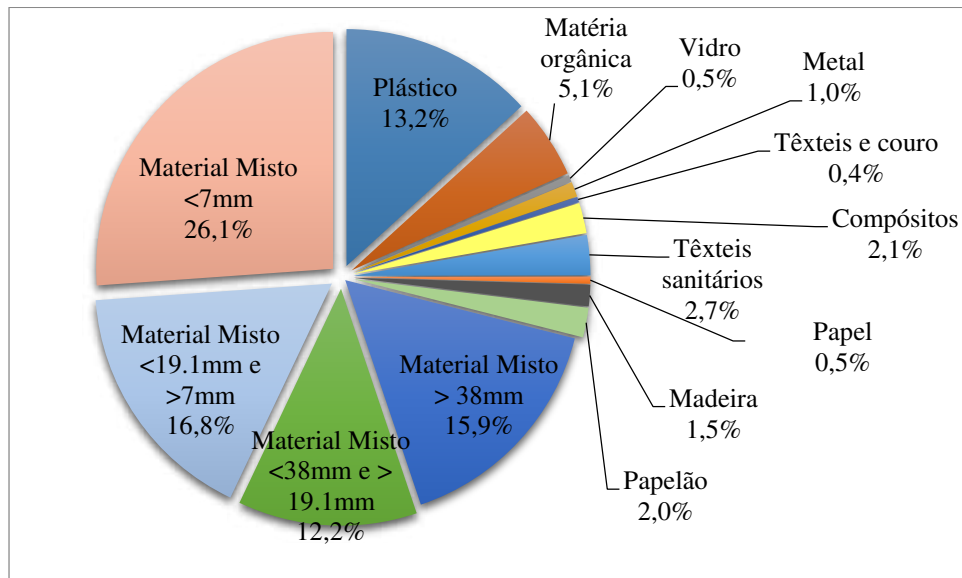
Conforme Dunnicliff (1993), os altos níveis de líquidos monitorados em Células de aterro podem estar associados ao aumento da pressão no interior do piezômetro devido a presença de bolsões de líquidos em camadas subjacentes, isoladas por camadas de baixa permeabilidade. O nível de líquido medido no piezômetro pode ser considerado maior que o nível real, uma vez que, o movimento de percolação descendente desses bolsões é significativo no aumento da pressão.

Segundo Gao *et al.* (2018), o nível do lixiviado é importante para a capacidade de armazenamento e estabilidade do aterro. Embora a capacidade de armazenamento do aterro possa ser efetivamente melhorada aumentando a altura do maciço sanitário, ao mesmo tempo, cresce a importância em controlar o nível de lixiviado de RSU para garantir a estabilidade do aterro.

5.2. Composições gravimétrica e volumétrica

As composições gravimétrica e volumétrica foram obtidas com adaptações da norma alemã GDA E1-7, onde os elementos foram subdivididos em onze categorias. A Figura 15 ilustra os resultados da composição gravimétrica dos RSU dispostos no ASCG.

Figura 15. Composição gravimétrica do Aterro Sanitário em Campina Grande - PB.



Conforme Figura 15, o material misto representou a maior porcentagem, totalizando 71% do peso total dos RSU depositados no ASCG – PB. A alta porcentagem de material misto está relacionada ao fato de que, os resíduos caracterizados, já estavam aterrados com a camada intermediária de solo e compactados, alterando suas propriedades e características deixando-os com difícil identificação durante a realização da composição gravimétrica, de modo que uma fração da matéria orgânica, provavelmente, esteja incluída na composição. Brito (2017) também observou elevado percentual de material misto, uma porcentagem de aproximadamente 75,68%.

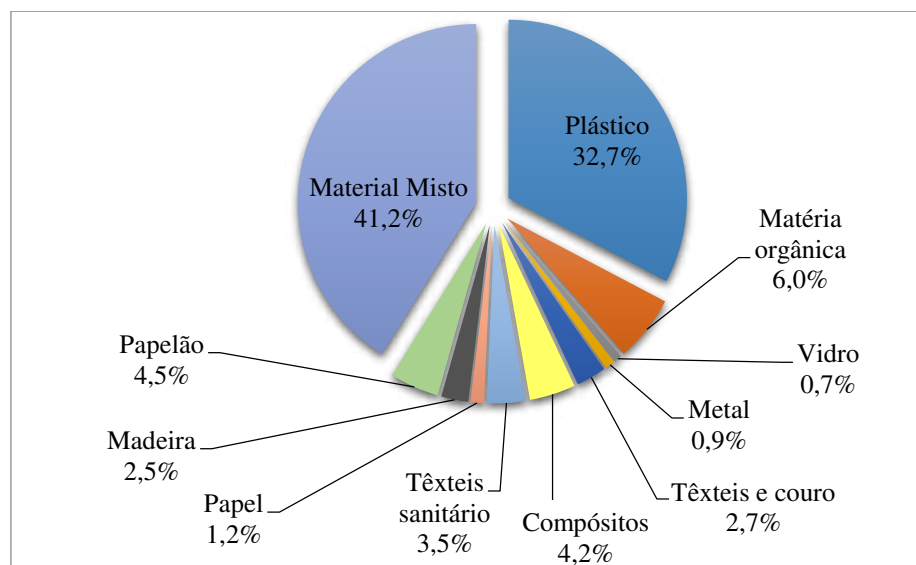
A matéria orgânica apresentou uma porcentagem de 5,1%. Esse baixo percentual está relacionado à coleta dos resíduos, uma vez que, os materiais coletados haviam passado pelo processo de homogeneização, e parte da matéria orgânica provavelmente esteja misturada ao material misto, bem como já passaram pelo processo de biodegradação. Araújo Neto (2016) encontrou percentual superior de matéria orgânica presente nos resíduos do ASCG, referente a 46,5 % da composição gravimétrica da fonte geradora, porcentagem superior a determinada neste estudo.

O percentual de materiais considerados recicláveis (17,2%), como plástico (13,2%), papel (0,5%), papelão (2,0%), vidro (0,5%), metal (1,0%), somados com as porcentagens de compósitos (2,1%), madeira (1,5%), têxteis e couro (0,4%) podem influenciar no retardamento do processo de decomposição dos RSU. A presença desses materiais no interior do maciço sanitário pode dificultar o fluxo de líquidos e gases, reduzindo assim, a eficiência dos sistemas de drenagem (GUEDES, 2018).

Os plásticos apresentaram uma porcentagem em peso de apenas 13,2%, enquanto que em termos de volume (Figura 16), a porcentagem praticamente foi triplicada, para 32,7% da quantidade total dos resíduos. Cabe ressaltar que a composição volumétrica foi realizada com os resíduos soltos, dessa forma, os plásticos apresentaram alto percentual em volume, porém, se destaca como um material altamente compressível. Em relação ao material misto, este também apresentou a maior porcentagem em volume, 41,2%, porém, inferior à sua porcentagem em peso de 71%.

Além disso, de acordo com Araújo Neto (2016), Abreu (2015) e Cardim (2008) os plásticos e os têxteis apresentam um papel de matriz de reforço, contribuindo para a maior resistência ao cisalhamento. Esse fato auxilia na elevação da altura das células e na estabilidade do maciço. Porém, como ponto negativo, os plásticos podem dificultar a compactação dos resíduos e auxiliar a formação de bolsões de líquidos e gases.

Figura 16. Composição volumétrica dos resíduos depositados no ASCG – PB.



Observa-se na Figura 16 que a matéria orgânica variou pouco em relação ao volume, apresentando uma porcentagem em volume de 6%, próxima à sua porcentagem em peso de 5,1%. Isso é justificado devido ao fato de a matéria orgânica não apresentar grande variação de volume imediato, apenas haverá redução de volume com o processo biodegradativo. (ARAÚJO NETO, 2016).

Os demais componentes como papel, papelão, têxteis sanitários, compósitos, metal, vidro, têxteis e couro e madeira apresentaram um aumento na porcentagem volumétrica em relação à porcentagem gravimétrica. Isso ocorre devido ao fato desses materiais possuírem

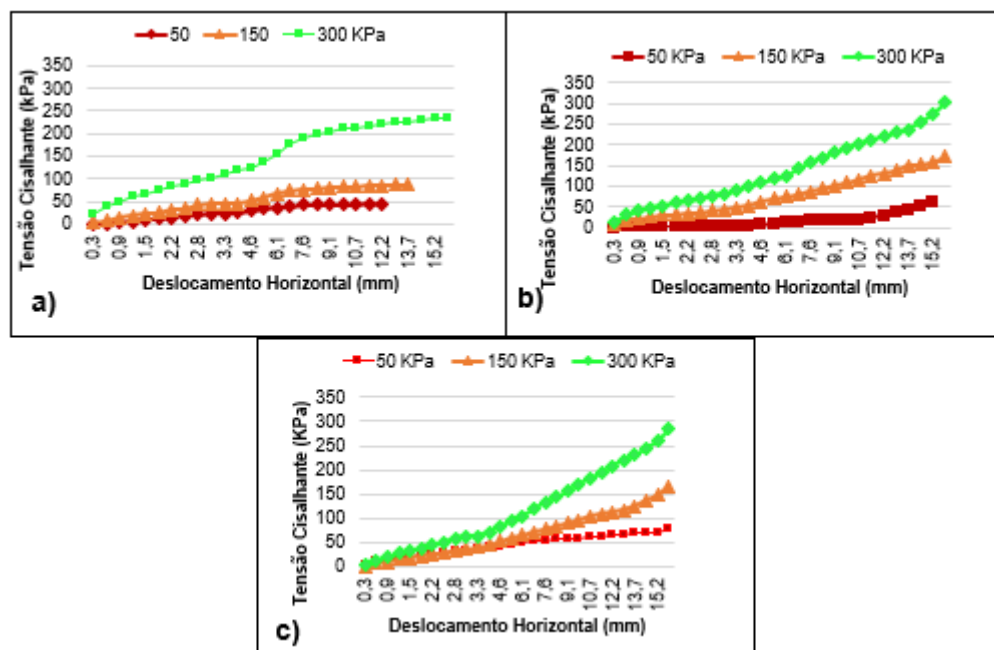
formas geométricas variadas e que ocupam espaços consideráveis, porém, possuem pequena densidade (VIEIRA, 2018).

Os resíduos metálicos apresentaram baixo percentual gravimétrico (1,0%) e volumétrico (0,9%) no aterro. Isso pode estar associado ao fato deste material apresentar alto valor no mercado de recicláveis e serem conduzidos ao aterro em percentual pequeno de rejeitos.

5.3. Resistência ao cisalhamento

A Figura 17 apresenta as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal de material misto com a) 0 %, b) 7,5 % e c) 15 % de plásticos. De modo geral, à medida que há o aumento da tensão normal, as tensões cisalhantes também aumentam, devido a maior interação entre as partículas.

Figura 17. Comportamento Tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal de material misto com a) 0 %, b) 7,5 % e c) 15 % de plásticos.



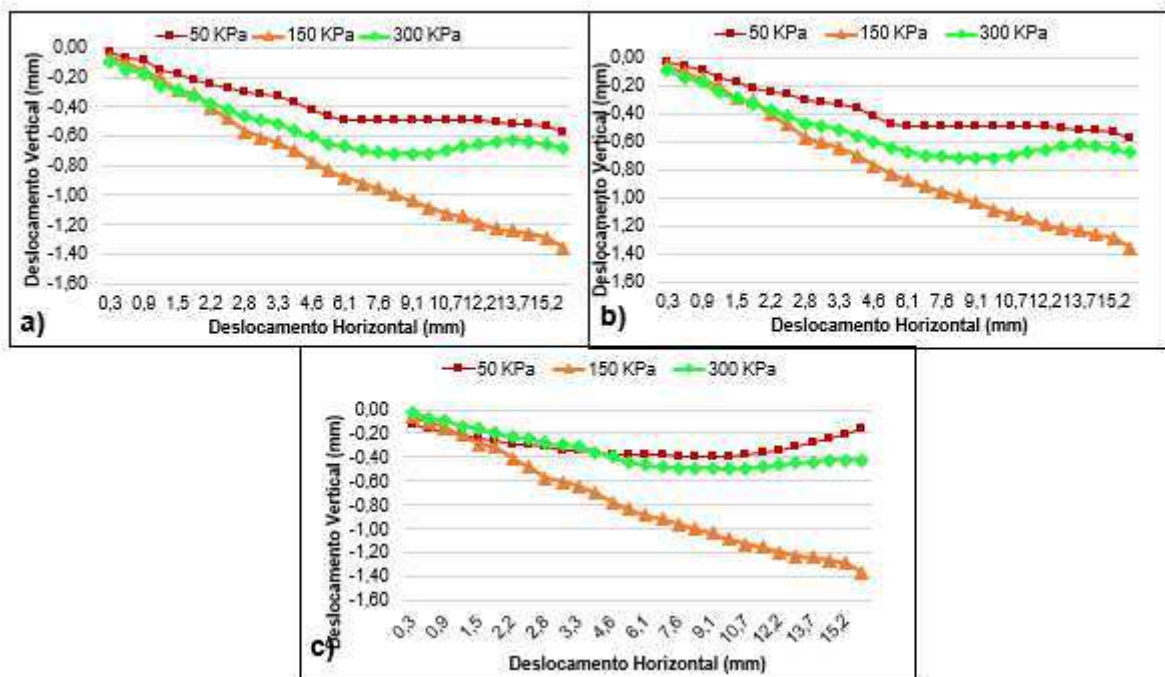
Observa-se também que as tensões cisalhantes são mais próximas quando as tensões aplicadas são menores, aumentando consideravelmente com a maior tensão aplicada de 300 kPa. Verifica-se também que em todos os ensaios, a tensão de cisalhamento apresentou um comportamento crescente até atingir um deslocamento horizontal de 15,2 mm, que é o

deslocamento máximo da caixa de cisalhamento do equipamento e, portanto, o ensaio precisa ser interrompido.

Comportamentos como esse também foram observados por Corrêa, Jucá & Motta (2015) e Brito (2017) com amostras ensaiadas com percentuais de plásticos variando entre 1% a 6% e 1% a 10%, respectivamente. Resultados similares também foram encontrados por Vieira (2018), para amostras de resíduos do ASCG recompostas com teor de plásticos em 13,2%. Os percentuais utilizados por esses autores encontram-se na faixa analisada na pesquisa.

Na Figura 18, tem-se o comportamento deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal de material misto com a) 0 %, b) 7,5 % e c) 15 % de plásticos.

Figura 18. Comportamento deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal de material misto com a) 0 %, b) 7,5 % e c) 15 % de plásticos.



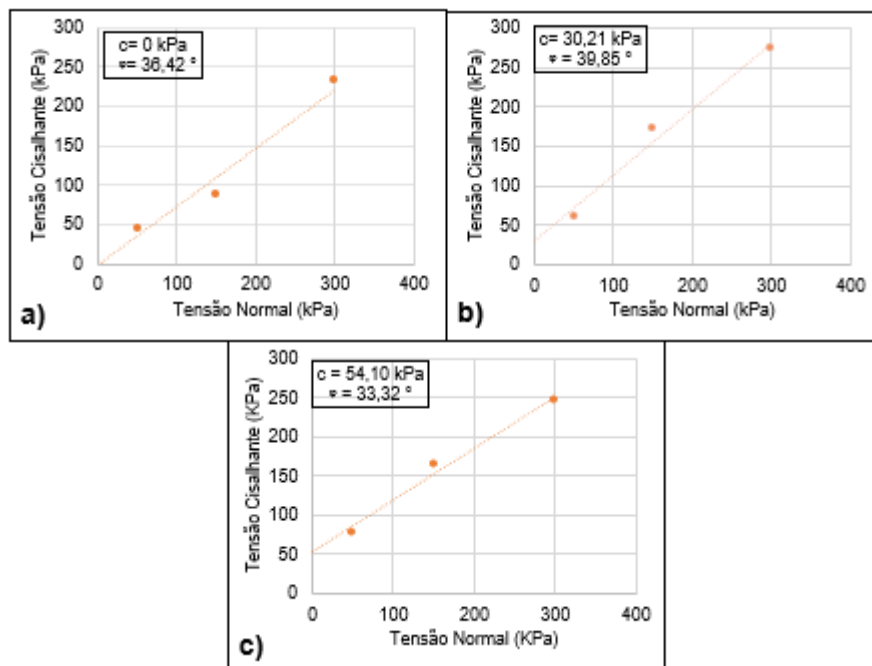
Nota-se que para todas as tensões normais aplicadas as amostras sofrem compressão, e resultados semelhantes foram encontrados por Abreu (2015). Pode-se afirmar que, esse comportamento tem influência do percentual de plásticos, uma vez que, são materiais altamente compressíveis, fato evidente ao se comparar a composição gravimétrica com a volumétrica realizada, representando respectivamente, 13,2 % e 32,7%, de seus totais.

Comportamento similar a esse foi observado por De Queiroz Motta (2011) para amostras de RSU com percentual de 15,4% de plástico mole. Segundo De Queiroz Motta (2011) esse

comportamento pode estar relacionado ao alto índice de vazios das amostras de RSU, bem como da amostra ensaiada.

A Figura 19 apresenta as envoltórias de resistência de material misto com a) 0 %, b) 7,5 % e c) 15 % de plásticos.

Figura 19. Comportamento Tensão cisalhante *versus* tensão normal de material misto com a) 0 %, b) 7,5 % e c) 15 % de plásticos.



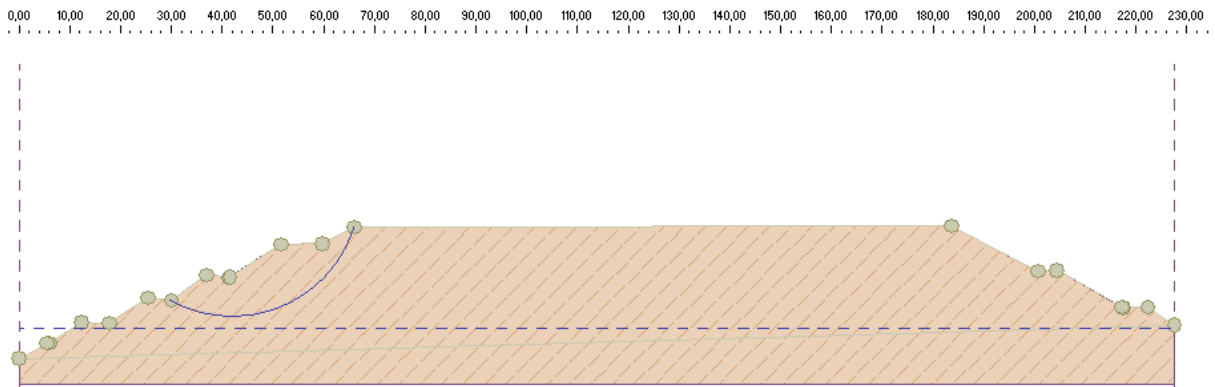
Percebe-se que na medida que se aumenta a quantidade de plástico ocorre um incremento na coesão, em função da resistência a tração dos plásticos que geram essa pseudocoesão, o que não acontece com o ângulo de atrito, pois apresentou redução com o teor de 15% de plásticos. Calle (2007) realizou ensaios de cisalhamento direto para fração de resíduos passantes na malha de 0,2 mm, inicialmente sem plásticos e, posteriormente, com a adição de plásticos moles, e verificou que o ângulo de atrito não era alterado pela adição de plástico, enquanto a coesão é extremamente dependente dessa adição.

Fucale (2005), indicou que o aumento da quantidade de fibras eleva a resistência do material, mas não indefinidamente, visto que, ao duplicar a quantidade de material plástico a resistência diminuiu. De forma simultânea, nessa pesquisa, a resistência sofreu diminuição quando comparados os resultados das amostras que continham 7,5 e 15% de plásticos. Segundo Alidoust, Keramati e Shariatmadari (2018), um maior percentual de plásticos resulta em mudanças na composição que são opostas à sua condição de reforço, de modo que as partículas deslizem umas sobre as outras.

5.4. Estabilidade de taludes

As análises de estabilidade foram realizadas utilizando o modelo de Morgenstern- Price (1965), com parâmetros oriundos dos ensaios de resistência ao cisalhamento para cada percentual de plástico (0 %, 7,5% e 15%), geometria da Célula e níveis de líquidos, correspondente ao maior nível registrado no período monitorado, da Macrocélula do Aterro Sanitário estudado, conforme representado na Figura 20. Os resultados referentes aos fatores de segurança para cada percentual de plástico são apresentados na Tabela 1.

Figura 20. Análise de estabilidade de talude de material misto e plástico.



Quadro 2. Resultados das análises da estabilidade do Aterro Sanitário em Campina Grande – PB, amostra de material misto com 0 %, 7,5% e 15% de plásticos.

Percentual de Plástico	Fator de Segurança (FS)
0,0%	2,92
7,5%	5,09
15%	5,92

Os resultados observados na Figura 20 e no Quadro 2 mostram fatores de segurança superiores aos recomendados pela norma técnica NBR 11.682 (ABNT 2009) para análises de estabilidade de taludes, que é de 1,5 nestes casos. Independente do percentual de plásticos todas as análises mostraram condição de segurança.

Pode-se observar que, à medida que há o aumento no percentual de plásticos, ocorre uma elevação no fator de segurança. Tomando as amostras de 0% e 7,5% de plástico, observa-se um crescimento de 43% no fator de segurança, ao passo que entre as amostras de 7,5% e 15,0% de plástico, na medida que se duplica a quantidade de material fibroso, tem-se apenas um incremento de 14% no coeficiente de segurança.

Soares *et al.* (2019), ao analisar o acréscimo de fibras em um maciço sanitário, observou que, ocorre um aumento da estabilidade a partir do aumento do ângulo de atrito, e estabeleceu em 20% o limite do percentual de fibras, a partir do qual o fator de segurança começa a diminuir.

Ao observar a amostra de 7,5% de plásticos, quando comparada a de 0%, observa-se aumento no ângulo de atrito (7,35%), bem como aumento significativo na sua coesão (100%). Para a amostra com 15% de plásticos, quando comparada à amostra de 7,5%, notou-se ligeira redução no ângulo de atrito (15%) acompanhada de aumento na coesão (44,15%), que justifica o baixo acréscimo no coeficiente de segurança.

Embora nesse estudo não tenham sido realizados ensaios com amostras acima de 15% de plásticos, percebe-se redução no ângulo de atrito, que poderia vir a ser acentuada com percentuais elevados. Segundo Alidoust, Keramati e Shariatmadari (2018), um maior percentual de plásticos resulta em mudanças na composição, que são opostas à sua condição de reforço, de modo que as partículas deslizem umas sobre as outras. Possível razão para redução do ângulo de atrito dos materiais.

As análises realizadas nesse estudo consideraram um nível de líquidos de aproximadamente 6,00 m, correspondente ao maior nível registrado no período monitorado. Conforme Rocha, Carvalho Junior e Jucá (2019) e Gao *et al.* (2018), o elevado nível de lixiviado é o fator de maior influência na estabilidade, podendo levar a uma ruptura úmida. Sendo assim, é necessário avaliar a estabilidade em função de diferentes níveis de líquidos presentes no maciço para se obter análises que venham a representar situações limites a condição de estabilidade.

6. CONCLUSÕES

Os plásticos apresentaram uma porcentagem em peso de apenas 13,2%, enquanto que em termos de volume, a porcentagem praticamente foi triplicada, para 32,7% da quantidade total dos resíduos, justificando a alta compressibilidade dos plásticos.

Encontrou-se níveis de líquidos com valores baixos e elevados, variando de menos de 0,10 m a 6,00 m. Os valores baixos de níveis de líquidos podem estar associados ao fato do aterro estar inserido em uma região semiárida, bem como não se ter operação no local desse piezômetro, já os valores elevados estão associados ao fato de recirculação e operação na área desses piezômetros, bem como a possível presença de bolsões de líquidos que possam comprometer o sistema de drenagem.

Os parâmetros de resistência são a coesão e o ângulo de atrito, de forma que o percentual de plástico favorece o incremento tanto de coesão como de ângulo de atrito, a coesão sempre crescente e o ângulo de atrito crescente até o percentual de 7,5%, favoráveis a resistência e estabilidade.

Considerando a variabilidade nos percentuais de plástico, o percentual de 7,5% de plástico tem alta contribuição na estabilidade, já o percentual de 15% tem baixo incremento quando comparado ao de 7,5%, sugerindo que elevados percentuais de plásticos atuem negativamente na estabilidade.

REREFÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: Resíduos Sólidos – amostragem de Resíduos. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.
- ABREU, A. E. S. **Investigação geofísica e resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- ABREU, A.E.S.; VILAR, O.M. **Influence of composition and degradation on the shear strength of municipal solid waste**. *Waste Management*, v. 68, p. 263–274, 2017.
- ALCÂNTARA, P. B. Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- 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.
- ALVES, F. S. Influência das condições meteorológicas na biodegradação dos resíduos sólidos urbanos em Campina Grande – PB. 2012. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB.
- ANDRADES, S. A. Estudo do fator de segurança de um aterro sanitário tipo convencional comparando com um aterro sanitário tipo encosta. 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- ARAÚJO NETO, C. L. Análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento de modelos estatísticos para previsão das deformações de aterros sanitários. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2016.
- ASTM, D3080–03 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Annual Book of ASTM Standards, ASTM, 2003.
- BABU, GL Sivakumar; REDDY, Krishna R.; SRIVASTAVA, Amit. Influence of spatially variable geotechnical properties of MSW on stability of landfill slopes. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 18, n. 1, p. 27-37, 2012.

- BELO HORIZONTE, Lei nº 9.529. Dispõe sobre a substituição do uso de saco plástico de lixo e de sacola plástica por saco de lixo ecológico e sacola ecológica, e dá outras providências, Diário Oficial do Município, DOM, Belo Horizonte, MG, 2008.
- BISHOP, A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, v. 5, n. 1, p. 7-17, 1955
- BOSCOV, M. E. G. Geotecnia ambiental. Oficina de Textos, 2008.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Lex: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS: Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.
- BRITO, I. S. A. Análise dos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento Devido as Fibras Têxteis Presentes nos Resíduos Sólidos Urbanos. 2017. 78 fls. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – UNINASSAU, Recife, 2017.
- BS – British Standard 1377-7-methods of test for Soils for civil engineering purposes-Part 7: Shear strength tests (total stress). London: UK: British Standard institute, 1990
- CALLE, J. A. C. Comportamento Geomecânico de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2007.
- CARDIM, R.D. Estudo da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)- Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- CASTRO, L. V. P. Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem c de contenção de rejeito alteada a montante / L.V.P. de Castro. - ed.rev. -São Paulo, 2008. 103 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.
- CORRÊA, C. L. Análise da influência do plástico mole na resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, 2013.
- CORREA, C.; JUCÁ, J. F.; MOTTA, E. Análise da influência do plástico mole na resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, V. 20, n. 3, p 427-436, 2015.
- DE QUEIROZ MOTTA, E. Avaliação da Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos com Codisposição de Lodo de Tratamento de Esgoto através de Ensaio de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões. 2011.
- DIXON, N., Jones. D. R. V. (2005). Engineering Properties of Municipal Solid Waste. *Geotextiles and Geomembranes* 23 (2005) 205-233.

- DGGT, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (1994). **Empfehlungen der Arbeitskreises “Geotechnik der Deponien und Altlasten”**. GDA E 1-7: Identifizierung und Beschreibung von Abfällen (Entwurf). Bautechnik 71, Helf 9, Berlin: Wilhelm Ernst e Sohn.
- DUNNICLIFF, John. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. John Wiley & Sons, 1993.
- FELLENIUS, W. Calculation of the stability of earth dams. In: Transactions of the 2nd congress on large dams, Washington, DC. International Commission on Large Dams (ICOLD) Paris, 1936.
- FUCALE, S. P. (2005) Influência Dos Componentes De Reforço Na Resistência De Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, CTG, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Setembro, 216p.
- GAO, W., BIAN, X. C., XU, W. J., & CHEN, Y. M. (2018). Storage capacity and slope stability analysis of municipal solid waste landfills. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32(4), 04018036.
- GAWLIK, F. M. Estudo da variação da resistência ao cisalhamento do resíduo sólido urbano devido à presença de plástico mole. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Área de Concentração: Estruturas, Curitiba, 2014.
- GDA-EMPFEHLUNGEN: Geotechnik der Deponien und Altlasten, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (Hrsg.), 3. Auflage, und Fortschreibung in ZS autechnik, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 1997.
- GERSCOVICH, D.M. S. Estabilidade de Taludes. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 168 p
- GUEDES, M. J. F. Estudo das emissões de biogás em aterro de resíduos sólidos urbanos no semiárido brasileiro. 2018. 181p. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.
- GURJÃO, R.Í. L., ARÁUJO NETO, C. L., SILVA, J.H., OLIVEIRA, J.K.L, PAIVA, W. Análise de Níveis de Líquidos em um Aterro Sanitário do Semiárido. In: **Forum Internacional de Resíduos Sólidos-Anais**. 2019. p. 10-10.
- HORIZONTE, BELO. Lei Ordinária nº. 9529/2008 de Belo Horizonte. 2011.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. Relatório nº. 29.956, Levantamento e análise das causas do escorregamento de massa de lixo no Aterro Bandeirantes – AS-1. Perus, São Paulo, 1991.

- JAHANFAR, A., AMIRMOJAHEDI, M., GHARABAGHI, B., DUBEY, B., MCBEAN, E., & KUMAR, D. (2017). A novel risk assessment method for landfill slope failure: Case study application for Bhalswa Dumpsite, India. *Waste Management & Research*, 35(3), 220-227.
- JANBU, N. Application of composite slip surfaces for stability analysis. In: Proc. European Conf. on Stability of Earth Slopes, Stockholm, 1954. 1954.
- JESSBERGER, H.L. Empfehlungen der Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V., Bautechnik 71, Helf 9, pp. 527-552, Ernst & Sohn, Berlin, 1994.
- KÖLSCH, F. (1993) The Bearing Behaviour of Domestic Waste and Related Consequences for Stability. CISA (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Landfill Symposium, Cagliari (Italy), Vol.2, pp. 1393-1410.
- KÖLSCH, F. (1995) Material Values for Some Mechanical Properties of Domestic Waste. CISA (Hrsg.): Proceedings of the 5th International Landfill Symposium, Cagliari (Italy), Vol.2, pp. 711-729.
- KÖLSCH, F. (1996) Der Einfluß der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungsabfall. Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der TU Braunschweig, Heft 133/96, ISSN 0343-1223, 158p. (Dissertation).
- KÖNIG, D. & JESSBERGER, H. L. (1997) Waste Mechanics. In: ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, pp. 35-76.
- MONTEIRO, Veruschka Escarião Dessoles et al. Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 223-230, 2006.
- MORGENSTERN, N. R., & PRICE, V. E. (1965). The analysis of the stability of genral slip surfaces. *Géotechnique*, Vol 15, No.1, pp. 79-93
- MOTTA, E. Q.; FERREIRA, S. R. M. ; JUCÁ, J. F. T. . Influência da poro-pressão de biogás e lixiviado na estabilização de talude de RSU. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2012, Porto de Galinhas - PE. XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. Camaragibe - PE: CCS, 2012. p. 1-8.
- MUNICH, K; BAUER, J. Monitoring of emissions and mechanical behaviour of MSW landfills: new techniques for a better understanding of the long-term behaviour. In: SITTRS – SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2006, Rio de Janeiro.

_____. NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1992. 7p.

NÓBREGA, C. C., FERREIRA, J. W. O., ATHAYDE JR, G. B., GADELHA, C. L., & COSTA, M. D. Monitoramento de chorume no antigo lixão do Roger em João Pessoa–Paraíba-Brasil. In: I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Espanha, Castellón, 2008.

OLIVEIRA, D. A. F. Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos. 2002, 154 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2002.

PINTO, Carlos de Souza. Curso Básico de Mecânica dos Solos, em 16 Aulas. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RAMAIAH, B, RAMANA, G, DATTA, M (2017) Mechanical characterization of municipal solid waste from two waste dumps at Delhi, India. **WasteManagement**, v. 68, p. 275-291, 2017.

SCHULER, A. R. Análise do Comportamento de um Aterro Municipal de Resíduos Sólidos Urbanos Instrumentado. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro 2010.

REMÉDIO, F. H. Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com N_{spt} . Dissertação - (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, 2014.

ROCHA, G. N., CARVALHO JUNIOR, F.H., JUCÁ, J.F.T. Estudo da estabilidade de célula para viabilizar aumento de vida útil em aterro sanitário. In: IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2019); VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2019) São Carlos, São Paulo, Brasil.

SANTOS JUNIOR, J. I. Análise da Poropressão em um Aterro Sanitário do Semiárido Nordeste. 2018. 51 fls. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – UNINASSAU, Campina Grande, 2018.

SRIVASTAVA, A.; REDDY, K. R. Probabilistic design of municipal solid waste landfill slopes. In: **XII International Symposium on Environmental Geotechnology, Energy and Global Sustainable Development Symposium Proceedings**. 2012.

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.

SHARIATMADARI, N; KARIMPOUR-FARD, M; KERAMATI, M; KOLARIJANI JAFARI, H; NAEBI, A.(2011) Fiber content impact on the shear strength of MSW materials in direct

shear tests. Proceedings Sardinia 2009, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium. Cagliari, Italy. 8p. CD-Room.

SILVA, Bruno Viegas da. **Estabilidade de taludes de aterros não controlados de resíduos**. 2014. Tese de Doutorado.

SOARES, N. D., SILVA, P.O., FAYER, S.K., DOMINGUES, J.V.F., ALMEIDA, J.R. Avaliação dos fatores influenciadores na estabilidade de aterros de resíduos. In: IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2019); VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2019) São Carlos, São Paulo, Brasil.

STARK, T. D., HUVAJ-SARIHAN, N., & Li, G. (2009). Shear strength of municipal solid waste for stability analyses. *Environmental Geology* 57, 1911–1923.

STRAUSS, Marcos. Análise de estabilidade de talude do aterro sanitário da zona norte de Porto Alegre. 1998.

TONUS, BP de A. **Estabilidade de taludes: Avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense**. 2009. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Curso de Engenharia Civil, UFPR, Curitiba.

VIEIRA, E.M.S. Avaliação da composição e resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterro sanitário. 2018. 35fls. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – UFCG, Campina Grande, PB, 2018.

VON SPERLING, M. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. 3 ed. Belo Horizonte: Ed. DESA/UFMG, 2005.

WHITMAN, Robert V.; BAILEY, William A. Use of computers for slope stability analysis. **Journal of Soil Mechanics & Foundations Div**, 1967.

YAMAWAKI A, OMINE K, DOI Y, et al. (2015) Slope stability of solid waste layers inside and outside of Japan. In: ISWA15 World congress Antwerp, 7–9 september 2015. Belgium, pp.499–504.

YAMAWAKI A, DOI Y, OMINE K et al. (2017) Slope stability and bearing capacity of landfills and simple on-site test methods. In: Waste Management & Research, march 2017.

ZHAN, T.I.T.; XU, X.B.; CHEN, Y.M.; MA, X.F.; LAN, J.W. Dependence of gas collection efficiency on leachate level at wet municipal solid waste landfills and its improvement methods in China. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 141, n. 4, p. 04015002, 2015.

ZEKKOS, D.; ATHANASOPOULOS, G. A.; BRAY, J. D.; GRIZI, A.; THEODORATOS, A.
Large-scale direct shear testing of municipal solid waste. *Waste Management, United Kingdom*,
v. 30, n. 8, p. 1544-1555, 2010.