

ÁREA TEMÁTICA: GESTÃO AMBIENTAL

UTILIZAÇÃO DE UM HUMBOLDT GEOGAUGE™ NA DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DO SOLO DE COBERTURA DE UM ATERRO SANITÁRIO

Samara Castro Freire¹ (sosamara505@gmail.com), Francisco Carlos Henrique Pio de Oliveira¹ (franciscocarlospho@gmail.com), Eliana Dantas Ribeiro¹ (elianadtr@hotmail.com), Gemmelle Oliveira Santos¹ (gemmelle@ifce.edu.br), Roberto Antônio Cordeiro da Silva² (roberto@det.ufc.br)

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus Fortaleza

²Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus do Pici

RESUMO

Essa pesquisa utilizou um equipamento chamado Humboldt GeoGauge™, muito aplicado na avaliação da qualidade da compactação dos solos em obras de engenharia civil, para medir a rigidez da camada de cobertura (bermas e talude) de uma parte do maior Aterro Sanitário do Estado do Ceará, mas em processo de encerramento da sua vida útil. Foram escolhidos nove locais, sendo três na berma inferior, três no talude e três na berma superior. Em cada ponto foram extraídas três leituras da rigidez do solo e do módulo de deformação para obtenção de uma média. Os resultados mostraram que as bermas são mais rígidas que o talude, indicando uma maior e menor compactação do solo, respectivamente. Cinco pontos foram classificados como fracamente rígidos ($k < 10 \text{ MN/m}$) e os outros quatro pontos como rígidos ($10 \text{ MN/m} > k < 12,96 \text{ MN/m}$). Tais resultados foram discutidos no contexto de outros importantes parâmetros do aterro estudado: teor de umidade do solo e dos resíduos, presença de gases, permeabilidade e granulometria dos solos, presença ou ausência de fissuras/trincas sobre a cobertura, considerando diversas abordagens da literatura. O Humboldt GeoGauge™ mostrou-se extremamente viável e adequado para a medição da rigidez dos solos da camada de cobertura do aterro sanitário em questão, abrindo - inclusive - novas linhas de investigação para a engenharia sanitária e ambiental e, principalmente, para o controle geotécnico desses empreendimentos.

Palavras-chave: Humboldt GeoGauge™, Compactação dos solos, Rigidez dos solos, Cobertura de Aterros Sanitários

USE OF A HUMBOLDT GEOGAUGE™ IN DETERMINING THE RIGIDITY OF THE COVERAGE SOIL OF A LANDFILL

ABSTRACT

This study used an equipment called Humboldt GeoGauge™, commonly applied in the evaluation of the quality of soil compaction in civil engineering works, to measure the rigidity of the cover layer (berms and slope) of a part of the largest Landfill of the State of Ceará, but in the process of closing its useful life. Nine sites were selected, three on the lower berm, three on the slope and three on the upper berm. At each point three readings of the soil rigidity and the strain modulus were extracted to obtain a mean. The results revealed that the bermes are more rigid than the slope, indicating a greater and smaller soil compaction, respectively. Five points were classified as weakly rigid ($k < 10 \text{ MN/m}$) and the other four points were rigid ($10 \text{ MN/m} > k < 12.96 \text{ MN/m}$). These results were discussed in the context of other important parameters of the landfill studied: soil and residue moisture content, presence of gases, soil permeability and granulometry, presence or absence of fissures/cracks on the cover, considering several approaches in the literature. The Humboldt GeoGauge™ proved to be extremely feasible and suitable for measuring the soil rigidity of the cover layer of the landfill in question, opening up new lines of research for sanitary and environmental engineering and especially for geotechnical control of these enterprises.

Keywords: Humboldt GeoGauge™, Soil Compaction, Soil Rigidity, Landfill Cover.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento das cidades somado à diminuição de áreas aptas (em termos técnicos, econômicos e ambientais) representam grandes entraves para a instalação de novos aterros sanitários, contribuindo para a adoção de medidas de ampliação da vida útil dos empreendimentos em operação e para a reutilização/alteamento de aterros encerrados.

Para Law et al. (2013) a expansão vertical de aterros sanitários exige avaliação detalhada do local com relação à estabilidade das encostas, capacidade de carga da fundação e qualidade dos sistemas de drenagem de lixiviados. Por isso, crescem as recomendações da inclusão do viés geotécnico no plano de monitoramento desses aterros.

Para Kölsch e Bauer (2009) assegurar a estabilidade é questão geotécnica central durante a operação e encerramento dos aterros sanitários, sendo que essa estabilidade depende de vários parâmetros: nível de lixiviado, coesão e ângulo de atrito dos resíduos (RONG; ZHAOGUI; TUGEN, 2011), composição e compactação dos resíduos, condições climáticas, geometria do aterro, estabilidade do solo (KÖLSCH e BAUER, 2009). Depende também do comportamento dos recalques dos resíduos e da integridade da camada de base e de cobertura (LAW et al. 2013).

Para Saravanan et al. (2007), do ponto de vista geotécnico, a seleção do tipo de camada depende da inclinação dos taludes, da altura do aterro, das propriedades que existem na interface solo-resíduo e do comportamento das deformações horizontais. Segundo os autores, a camada precisa resistir também a sobreposição de novos resíduos, expansão/contração térmica de materiais e transferência de tensões.

As camadas de cobertura dos aterros sanitários estão sujeitas ainda a um grande número de solicitações: variações de temperatura, ciclos de umedecimento e secagem, erosão por água ou vento, presença de raízes e animais (BOSCOV, 2008). A própria degradação da matéria orgânica agrega riscos geotécnicos em função da formação de depressões e deslocamentos de solo da cobertura final para o interior dos resíduos [...] ocasionando a perda de estanqueidade e o surgimento de fissuras e trincas (ALVES, 2010), o que prejudica a selagem do aterro e sua consequente sustentabilidade (COSTA, 2015).

Diante de tantas variáveis, calcular corretamente a estabilidade de um aterro sanitário é uma tarefa ambiciosa (KÖLSCH e BAUER, 2009), mas que tem despertado, sob diversas metodologias, o interesse de muitos pesquisadores (STRAUSS, 1998; FORTUNA OLIVEIRA, 2002; SIMÕES et al., 2003; BORGATTO, 2006; CATAPRETA, 2008; SCHULER, 2010; MOREIRA et al., 2013; REMÉDIO, 2014; SILVA, 2017).

No Brasil, existem 687 aterros sanitários, sendo que 61% possui alguma atividade classificada como de monitoramento ambiental (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS, 2016). No Estado do Ceará existem 06 aterros sanitários (SNIS, 2016), sendo que o maior deles fica na Região Metropolitana de Fortaleza: o aterro sanitário de Caucaia, com 123 hectares.

O Aterro Sanitário de Caucaia começou a receber os resíduos sólidos de Fortaleza em 1998 e deve encerrar suas atividades este ano (2019), sendo de extrema importância iniciar seu monitoramento geotécnico. Nesse sentido, essa pesquisa utilizou um equipamento chamado Humboldt GeoGauge™, muito aplicado na avaliação da qualidade da compactação dos solos em obras de pavimentação, para medir a rigidez dos solos da camada de cobertura de uma parte do referido aterro. Os resultados obtidos, além de inéditos, podem desencadear o monitoramento geotécnico dos demais aterros do Estado do Ceará.

2. OBJETIVO

Avaliar o comportamento da rigidez do solo da camada de cobertura (bermas e talude) de um aterro sanitário por meio de um Humboldt GeoGauge™.

3. METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido no Aterro Sanitário de Caucaia, Região Metropolitana de Fortaleza. A Figura 1 mostra o local onde os ensaios foram realizados no contexto da área do Aterro.

Figura 1. Limites do Aterro Sanitário de Caucaia (em amarelo) e localização da área pesquisada (em azul)



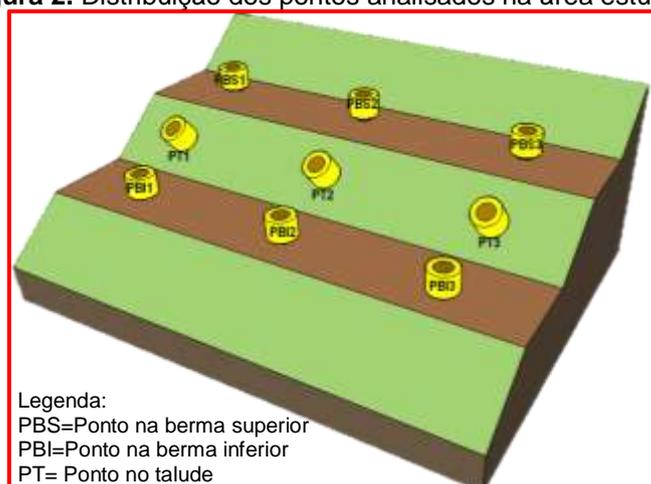
A área pesquisada tem 929m² e 125m de perímetro. Foi composta por 02 bermas e 01 talude. Seus limites são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Coordenadas geográficas dos limites da área pesquisada

Pontos	Latitude (S)	Longitude (O)	Pontos	Latitude (S)	Longitude (O)
A	3°47.632'	38°40.308'	C	3°47.615'	38°40.321'
B	3°47.625'	38°40.298'	D	3°47.608'	38°40.310'

Foram escolhidos 09 pontos da camada de cobertura para realização dos ensaios, sendo 03 pontos paralelos na berma inferior; 03 pontos no talude e 03 pontos na berma superior. Em cada ponto foram realizadas 03 medições, conforme sugeriu Conde, Caldeira e Lopes (2010). A distribuição aproximada dos pontos é mostrada na Figura 2.

Figura 2. Distribuição dos pontos analisados na área estudada



A rigidez do solo da camada de cobertura foi medida com um equipamento chamado Humboldt GeoGauge™. Ele permite um ensaio não destrutivo em comparação a outros ensaios comumente realizados no dimensionamento mecânico-empírico do solo (MAIA; SILVA; BARROSO, 2018), Figura 3. Conforme Lenke, Gordon McKeen e Grush (2003) a rigidez do solo, indiscutivelmente, é o parâmetro de engenharia mais importante no controle da compactação e resistência mecânica dos solos.

Figura 3. Vista do equipamento Humboldt GeoGauge™ sobre o solo do aterro sanitário



O Humboldt GeoGauge™ aplica uma força dinâmica, muito reduzida, com frequências variáveis (com incrementos de 4 Hz) entre 100 e 196 Hz (ALSHIBLI et al. 2005). Durante o ensaio, a força aplicada (F) e o respectivo deslocamento (δ) são medidos para 25 diferentes frequências de vibração. A força máxima produzida pelo Humboldt GeoGauge™ corresponde a 9N e os deslocamentos induzidos no solo não ultrapassam $1,27 \times 10^{-6}$ m (ALSHIBLI et al. 2005).

Como resultado do ensaio, o equipamento fornece o valor médio da rigidez ($k = F / \delta$) medidos para cada frequência e cada ensaio tem uma duração aproximada de 1,5 minutos. Para cada frequência, o equipamento faz a medição e a comparação de velocidades de dois sensores. Os transdutores utilizados são geofones que, pelo seu princípio de funcionamento, fornecem uma variação de voltagem proporcional à velocidade. Tendo em conta as características do ensaio, este tipo de sensores são suficientemente precisos e constituem uma alternativa mais econômica em relação à utilização de acelerômetros (HUMBOLDT, 2007; ALSHIBLI et al. 2005; FORTUNATO, 2005).

Trata-se de um equipamento eletromecânico e portátil, que in situ traduz a rigidez de camadas compactadas de solo ou agregados. O equipamento pesa cerca de 10kg e tem forma cilíndrica, com 0,280m de diâmetro e 0,254m de altura. O seu apoio sobre a superfície do terreno é feito a partir de uma base anelar metálica. O contato entre a base e superfície deve ser de no mínimo 60% para evitar erros nas leituras (CONDE; CALDEIRA; LOPES, 2010).

A diferença entre os resultados obtidos com o Humboldt GeoGauge™ e um ensaio de carga com placas não ultrapassa 10% (NELSON e SONDAG, 1999). Tal diferença é ainda menor se comparada com os resultados de programas de computador: 5% (LENKE; GRUSH; GORDON McKEEN, 1999).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores da rigidez foram maiores nas bermas que no talude, indicando - em primeira análise - uma maior e menor compactação do solo, respectivamente (Tabela 2). A própria inclinação do talude e as dificuldades que se tem para sua execução (dentro da atribulada rotina de um aterro

sanitário) ajudam a entender seus resultados. Além disso, são as bermas que sofrem constante compactação devido ao tráfego de veículos e máquinas pesadas que buscam acessar a frente de operação (setor de descarga) do aterro sanitário, justificando seus valores maiores.

Tabela 2. Valores da rigidez e do módulo de deformação medidos nas bermas e talude

Local	Pontos	Rigidez (MN/m)	Módulo de Deformação (MPa)
Berma Inferior	PBI 1	12,1	104,9
	PBI 2	8,4	72,8
	PBI 3	10,1	87,2
Talude	PT 1	2,8	24,2
	PT 2	1,5	12,7
	PT 3	2,1	18,1
Berma Superior	PBS 1	7,4	63,9
	PBS 2	10,8	93,6
	PBS 3	10,8	93,3

PBI = Ponto na Berma Inferior, PT = Ponto no Talude, PBS = Ponto na Berma Superior

Para valores de rigidez abaixo de 10 MN/m (medidas com o Humboldt GeoGauge™) Chen et al. (1999) classificam a compactação do solo como fracamente rígida (nessa pesquisa 05 pontos teriam esse conceito: o PBI 2, os três pontos do talude e o PBS 1). Valores de rigidez acima de 10 MN/m até 12,96 MN/m, conforme Collins e Connor (2011), classificam a compactação como rígida (04 pontos dessa pesquisa: PBI 1 e 3, PBS 2 e 3). Nenhum ponto da área estudada foi classificado como altamente rígido (acima de 14,82 MN/m conforme definição de White et al., 2005).

Na berma inferior e no talude, a rigidez foi menor no “ponto central” (PBI 2 e PT 2) indicando a ausência de cuidados no fechamento das escavações realizadas pelo operacional do aterro sanitário quando da instalação de drenos horizontais de captação forçada de gás (na realidade, observou-se que para evitar danos aos tubos de PEAD, Figura 4, pouca ou nenhuma compactação tem sido realizada sobre esse local). Conforme Fredlund e Rahardjo (1993) a presença, em solos, de uma pressão negativa nos poros (sucção) é um dos principais fatores de alteração do comportamento geomecânico.

Figura 4. Escavação e instalação dos drenos horizontais de PEAD de 160mm



Conforme Nelson e Sondag (1999) uma menor rigidez pode ter relação com um teor de umidade inadequado para a efetiva compactação do solo; sem descartar a possibilidade de o próprio compactador soltar o solo mais superficial, causando uma leve diminuição na rigidez. Para Quinta-Ferreira (2015) os menores valores da rigidez estão associados às piores áreas, ou seja, onde o grau de degradação da camada é maior. Além disso, explica o autor, baixo módulo de rigidez em áreas significativas indica grave problema de drenagem.

Os resultados obtidos em uma pesquisa paralela realizada pela equipe mostraram uma maior concentração de gases próximo ao “centro” da área estudada (PBI 2 e PT 2), ajudando a entender que a pressão exercida pelo acúmulo desses gases sob a camada de cobertura está aumentando a instabilidade do solo e diminuindo sua rigidez, provavelmente.

Merry, Kavazanjian e Fritz. (2005) lembram que o acúmulo de gás no aterro pode gerar uma pressão excessiva entre os poros presentes entre o solo e os resíduos [...] diminuindo o fator de segurança referente à estabilidade do talude. Pressões excessivas de gás [...] reduzem ainda mais a tensão efetiva dos resíduos e a resistência ao cisalhamento (JAFARI; STARK; MERRY, 2013).

Conforme a literatura (PESTANA, 2008; CONDE; CALDEIRA; LOPES, 2010; CONDE et al., 2013) existe uma significativa correlação da rigidez medida com o Humboldt GeoGauge™ e o teor de água, ou seja, o aumento dos teores de água implica na diminuição da rigidez do solo. Um solo que se encontra saturado possui pouca resistência (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Os ensaios de compactação do solo realizados com amostras da área pesquisada mostraram umidade ótima variando entre 12,97 e 16,61% e massa específica seca entre 1,73 e 1,84 g/cm³; resultados semelhantes aos de Santos (2012), que pesquisou o mesmo aterro sanitário. Por outro lado, foi verificado um déficit de compactação na camada de cobertura variando entre 10,6 e 16,0%.

O solo da área estudada foi classificado como areno-silto-argiloso, relativamente bem graduado e que naturalmente (pelo grande % de areia) não “aceita” boa compactação (geralmente a areia tem mais atrito que coesão). Ainda sob tal condição, os resultados obtidos com o Humboldt GeoGauge™, em termos técnicos, podem ser considerados adequados (QUINTA-FERREIRA; ANDRADE, 2008).

Os teores de umidade da mistura solo-resíduo de 05 amostras extraídas do local escavado para disposição do dreno mostrado na Figura 4 apontaram para teores variando entre 10,29 - 16,34% de umidade; resultados semelhantes aos obtidos por Medeiros et al. (2002) em outros aterros sanitários do Brasil.

A presença de água, por sua vez, tem relação com a permeabilidade do solo. O solo da área estudada tem uma permeabilidade que varia entre $1,4 \times 10^{-4}$ e $4,5 \times 10^{-3}$ cm/s, ou seja, valores maiores que os obtidos por Santos (2012) no mesmo aterro sanitário (10^{-5} cm/s) e por outros autores (RITTER et al., 2002; FRANCESCHET et al., 2005; TOZETTO, 2008).

Conforme Pinto (2006) o coeficiente de permeabilidade se relaciona com a estabilidade do solo porque a tensão efetiva (que comanda a resistência do solo) depende da pressão neutra, que por sua vez depende das tensões provocadas pela percolação da água. Para Kölsch e Bauer (2009) a presença de grandes volumes de água dentro do aterro, reduz a pressão efetiva normal e a resistência ao cisalhamento. Por isso, projetos de recirculação de chorume em aterros sanitários precisam ser bem dimensionados e monitorados (JAFARI, STARK e MERRY, 2013).

Huvaj-Sarihan e Stark (2008), após retroanálise do rompimento de 04 aterros sanitários (Polônia, Turquia, Israel e Filipinas) apontaram entre as possíveis causas desses acidentes a presença elevada de água tanto nos solos quanto nos resíduos. Os autores também citaram a presença de

resíduos da construção civil na camada de cobertura (algo também observado nessa pesquisa), presença de rachaduras no topo do aterro, acúmulo elevado de chorume dentro do maciço, taludes muito íngremes, falta de cobertura vegetal e de drenagem de águas pluviais, grande processo erosivo, bolsões de água no topo do aterro (algo também observado nessa pesquisa).

Conforme Peng et al. (2016) o aumento adicional da água no interior do aterro aumenta o peso dos resíduos sólidos, ocasionando assim grandes deformações do maciço e consequentes deslizamentos da camada de cobertura. Para melhorar a resistência do solo de um aterro sanitário, Rong, Zhaogui e Tugen (2011) sugerem aumentar a espessura e a compactação da camada de cobertura e promover um bom sistema de drenagem de lixiviados e de águas pluviais, reduzindo a saturação do solo.

A rigidez de um solo de aterro sanitário também pode ser correlacionada com a presença ou ausência de fissuras/trincas. Geralmente, a rigidez diminui com o crescimento do fissuramento. Conforme Lakshmikanta (2009) o processo de fissuramento se inicia quando as forças de tensão excedem a resistência à tração do solo, sendo que essa resistência é função do teor de umidade do solo e da sucção. Dessa maneira, segundo os autores, as fissuras podem constituir caminhos preferenciais à percolação da água da chuva e gases resultantes da biodegradação, aumento a instabilidade da área. White et al. (2008) acrescentam que uma rigidez não uniforme (em termos de valores) e a intensidade da referida tensão são os fatores que determinam o grau de fissuramento do solo.

Para Kölsch e Bauer (2009) o parâmetro que mais contribui para o aumento da estabilidade de um aterro sanitário é a densidade dos resíduos, por entenderem que uma alta densidade cria uma alta tensão normal, resultando em alta resistência ao cisalhamento. Além disso, complementam os autores, uma maior densidade pode resultar em menor permeabilidade, mantendo um equilíbrio hídrico adequado dentro do aterro.

5. CONCLUSÃO

Em linhas gerais, a área estudada parece mais instável que estável, pois predominaram os pontos do solo classificados como fracamente rígidos. Teve grande influência sobre tal classificação os resultados medidos no talude.

A rigidez dos solos da camada de cobertura do aterro sanitário, diferentemente de outras obras citadas na literatura, tem significativa variabilidade em curtas distâncias, o que evidencia a necessidade de mais atenção e monitoramento geotécnico.

Alguns parâmetros, mesmo que não determinados nessa pesquisa, parecem ter forte influência sobre a rigidez do solo do aterro sanitário: compactação, pressão de líquidos e gases, balanço hídrico dos solos e resíduos, tipo de solo, histórico das tensões, trincas etc.

O Humboldt GeoGauge™ mostrou-se extremamente viável e adequado para a medição in situ da rigidez dos solos da camada de cobertura do aterro sanitário em questão, abrindo - inclusive - novas linhas de investigação para a engenharia sanitária e ambiental e, principalmente, para o controle geotécnico desses empreendimentos. Isso não exclui a possibilidade de utilizá-lo concomitantemente a outros equipamentos e testes, para os quais também é preciso cuidadosa interpretação dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ALSHIBLI et al. Laboratory Evaluation of the Geogauge and Light Falling Weight Deflectometer as Construction Control. **Jornal of Materials in Civil Engineering**. v.17, n.5, 2005.
- ALVES, A. K. **Proposta de manual técnico de medidas preventivas e corretivas para aterros sanitários encerrados**. 2010. 210p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.
- BORGATTO, A. V. A. **Estudo das propriedades geomecânicas de resíduos sólidos urbanos pré-tratados**. 2010. 306p. Tese (Doutorado), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 248p, 2008.
- CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação**. 2008. 316p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- CHEN et. al. Evaluation of In Situ Resilient Modulus Testing Techniques. **Geotechnical Special Publication**, American Society of Civil Engineers: Reston, Virg, p.1-11, 1999.
- COLLINS, R.; CONNOR, B. **The Use of Geofibers and Synthetic Fluids Kwigillingok Airport**. Fairbanks: Alaska University Transportation Center/Alaska Department of Transportation and Public Facilities, Final Report, 22p., 2011.
- CONDE et al. Applicability of the Geogauge, P-FWD and DCP for compaction control. In: 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, **Proceedings**, p.1263-1266, Paris, 2013.
- CONDE, M. C.; CALDEIRA, L.; LOPES, M. G. Estudo das condições de aplicação do GeoGauge e do deflectômetro de impacto portátil no controlo da compactação. In: Congresso Nacional de Geotecnia, 12, Guimarães. **Anais...** Guimarães, 2010.
- COSTA, C. M. C. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos**. 2015. 181p. Tese (Doutorado), Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- FORTUNA OLIVEIRA, D. A. **Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos**. 2002. 173p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.
- FORTUNATO, E. **Renovação de Plataformas Ferroviárias: estudos relativos à Capacidade de Carga**. 2005. 628p. Tese (Doutorado), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2005.
- FRANCESCHET et al. Estudo dos solos utilizados para a impermeabilização da camada de base e de cobertura de aterros sanitários de Santa Catarina. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, 2005, Campo Grande. **Anais...**Campo Grande, 2005.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley and Sons Inc., 1993.

HUMBOLDT Mfg. Co. **GeoGauge User Guide**. Version 4.1, 2007.

HUVAJ-SARIHAN, N.; STARK, T. D. Back-Analyses of Landfill Slope Failures. 6th International Conference On Case Histories In Geotechnical Engineering, **Proceedings**, 8p., paper n.2.34, 2008.

JAFARI, N. H.; STARK, T. D.; MERRY, S. The July 10 2000 Payatas Landfill Slope Failure. **International Journal of Geoengineering**, v.2, n.3, p.208-228. 2013.

KÖLSCH, F.; BAUER, J. Static Stability of Landfills. In: International Waste Working Group - IWWG, **Proceedings**, Sardinia, 18p., 2009.

LAKSHMIKANTA, M. R. **Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils**. 2009. 390p. Tese (Doutorado), Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2009.

LAW et al. Maximizing Landfill Capacity by Vertical Expansion: a Case Study for an Innovative Waste Management Solution. In: ISWA World Congress, **Proceedings**, Vienna, Austria, 9p., 2013.

LENKE, L. R.; GORDON McKEEN, R.; GRUSH, M. P. Laboratory Evaluation of GeoGauge for Compaction Control. **Transportation Research Record**, v.1849, v.1, p.20-30, 2003.

MAIA, C. L.; SILVA, C. A. U.; BARROSO, S. H. A. Comparative Analysis of Resilience Modules Obtained in Field with Geogauge and Those Obtained in the Laboratory. In: 13th International Society for Asphalt Pavements (ISAP) Conference, **Proceedings**, Fortaleza: ISAP, 2018.

MEDEIROS et al. Balanço hídrico em aterros de resíduos sólidos urbanos escala experimental de laboratório. In: CASTILHOS JÚNIOR et al. (Org.). **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades** (coletânea de trabalhos técnicos), Rio de Janeiro, ABES, RiMa, Projeto PROSAB, 2002.

MERRY, S. M.; KAVAZANJIAN, E.; FRITZ, W. U. Reconnaissance of the July 10, 2000, payatas landfill failure. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v.19, n.2, p.100-107, 2005.

MOREIRA et al. Caracterização geofísica em aterro de resíduos sólidos para avaliação de condicionantes de instabilidade geotécnica. **Geologia USP - Serie Científica**, v.13, n.1, p. 25-34, 2013.

NELSON, C. R.; SONDAG, M. **Comparison of the Humboldt GeoGauge with In-Place Quasi-Static Plate Load Tests**. CNA Consulting Engineers Report, Minneapolis, 5p., 1999.

PENG et al. Back-Analyses of landfill instability induced by high water level: case study of Shenzhen landfill. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.13, n.1, Jan., 2016.

PESTANA, R. M. M. **Contribuição ao estudo do comportamento mecânico de resíduos de construção e demolição aplicados em estradas de baixo tráfego**. 2008. 153p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 247p., 2006.

QUINTA-FERREIRA, M. Ground Stiffness Evaluation Using the Soil Stiffness Gauge (SSG). In: Lollino et al. **Engineering Geology for Society and Territory**. Heidelberg: Springer, 2015.

QUINTA-FERREIRA, M.; ANDRADE, P. S. Alguns resultados do Geogauge e do deflectómetro de impacto (FWD) na caracterização de pavimentos. In: Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, 4., p. 161-168, **Anais...** Coimbra, 2008.

REMÉDIO, F. H. **Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos sólidos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com N_{SPT}** . 2014. 131p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista, Atibaia, 2014.

RITTER et al. Avaliação da permeabilidade da barreira de proteção da fundação do aterro sanitário de Pirai-RJ. In: Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 6., 2002. Vitória. **Anais...** Vitória, 2002.

RONG, F.; ZHAOGUI, G.; TUGEN, F. Analysis of Stability and Control in Landfill Sites Expansion. **Procedia Engineering**. v.24, p.667-671, 2011.

SANTOS, G. O. **Avaliação do cultivo de gramíneas na superfície de aterro sanitário, com ênfase para a redução da emissão de metano e dióxido de carbono para a atmosfera**. 2012. 313p. Tese (Doutorado), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

SARAVANAN et al. Landfill interface study on liner member selection, stability assessment, and factor of safety predictions with seismic loading. In: 2nd Malaysia-Japan Symposium on Geohazards and Geoenvironmental Engineering, **Proceedings**, Venue: Langkawi, Malaysia, 2007.

SCHULER, A. R. **Análise do comportamento de um aterro municipal de resíduos sólidos urbanos instrumentado**. 2010. 173p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SILVA, R. A. C da. **Avaliação da evolução do comportamento geomecânico de aterros sanitários com base na realização de ensaios de laboratório e de campo**. 2017. 138p. Tese (Doutorado), Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SIMÕES et al. Monitoramento Geotécnico de Aterros Sanitários - A Experiência da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040 em Belo Horizonte - MG. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 5., **Anais...** 2003.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. **Diagnóstico do manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - SNSA, Brasília, 2016.

STRAUSS, M. **Análise de estabilidade de talude do Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre**. 1998. 137p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

TOZETTO, C. M. **Modelagem matemática de aterros sanitários com a simulação hidrológica da geração de lixiviado**: estudo de caso do aterro sanitário de Curitiba. 2008. 156p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

WHITE et al. Fly Ash Soil Stabilization for Non-Uniform Subgrade Soils. **Tech Transfer Summaries**, Iowa State University, 2005.