

### III-073 - METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS ATERRADOS

**Karina Escandiel<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil, graduada pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

**Marcelo Oliveira Caetano<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil, e de Segurança do Trabalho. Mestrado em Engenharia Civil: Gerenciamento de Resíduos. Doutorado em Engenharia de Minas Metalúrgica e Materiais. Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

**Bruno Susin<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil, mestrando em Engenharia Civil: Gerenciamento de Resíduos na Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

**Luciana Paulo Gomes<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil, Mestrado e Doutorado em Engenharia Civil. Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

**Luis Alcides Schiavo Miranda<sup>(1)</sup>**

Químico Industrial, Doutorado em Ciências e Pós-Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Unisinos, 950 – Bairro Cristo Rei – São Leopoldo – RS – CEP: 93.022-750 – Tel: (51) 35911122 Ramal 1699 – email: [karinaeescandiel@gmail.com](mailto:karinaeescandiel@gmail.com), [mocaetano@unisinos.br](mailto:mocaetano@unisinos.br), [brsusin@gmail.com](mailto:brsusin@gmail.com), [lugomes@unisinos.br](mailto:lugomes@unisinos.br), [lalcides@unisinos.br](mailto:lalcides@unisinos.br)

#### RESUMO

Além dos monitoramentos convencionais em aterros sanitários (operação, água subterrânea, lixiviados, gás, etc), cabe um destaque ao monitoramento do comportamento geotécnico destas áreas. O objetivo deste acompanhamento é justificado pela presença de adensamento dos resíduos e potenciais riscos de cisalhamento dos taludes devido, principalmente, ao deslocamento de lixiviados e bolsões de gás no interior dos aterros. Neste contexto, é importante a determinação de coeficientes geotécnicos necessários para predição destes adensamentos e acidentes, sendo que a massa específica é um parâmetro de extrema relevância. Contudo as metodologias tradicionais para obtenção deste dado levam em consideração as características de solos, não sendo parâmetro para replicar na área de resíduos sólidos. Com isso, o objetivo desta pesquisa foi propor uma metodologia para determinação da massa específica dos grãos dos resíduos sólidos domésticos, índice utilizado para cálculo de recalques diferenciais em aterros sanitários. Foram coletadas amostras em um aterro sanitário fechado a 10 anos. As amostras foram caracterizadas e ensaios para determinação da massa específica dos resíduos sólidos domésticos seguiram uma adaptação da ABNT NBR 6508 (1984). Os resultados mostraram uma massa específica real dos grãos variando entre 1,09 g/cm<sup>3</sup> e 1,17 g/cm<sup>3</sup>. Estes dados estão coerentes com valores encontrados na literatura, permitindo validar a metodologia proposta pela pesquisa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Geotecnia, Massa Específica, Aterro Sanitário.

#### INTRODUÇÃO

O Brasil gerou em 2017 214.868 toneladas de resíduos sólidos urbanos. Um índice na ordem de 1,035 kg/habitante.dia. Destes, 115.801 toneladas foram dispostas em aterros sanitários (ABRELPE, 2017).

Em relação a aterros sanitários, Pessin et al. (2002), Santos (1994), Chernicharo et al. (2003), Burton & Watson-Craik (1998) e Renou et al. (2008), descrevem que este é o método de disposição mais utilizado mundialmente. Segundo este último autor, do total dos RSU gerados nos países Coréia, Polônia e Tailândia, a quantidade de resíduos disposta em Aterros Sanitários é, respectivamente, de 52%, 90% e 95%. Renou et al. (2008) complementa ainda mencionando um estudo onde comparou os diversos tipos de tratamento de resíduos

(Aterro Sanitário, Incineração, Compostagem, etc...). Segundo o autor, o Aterro Sanitário resultou no método com maiores vantagens econômicas.

Além de vantajosa financeiramente, se devidamente projetado, operado e monitorado, torna-se uma solução ambientalmente e tecnicamente segura. Devido a ser um biodigestor projetado e operado de forma a favorecer a biodegradação anaeróbia, as principais preocupações em relação aos Aterros Sanitários referem-se aos produtos gerados, quais sejam lixiviados e gases de aterro.

Conforme Pessin et al. (2002), Aterros Sanitários adequados incorporam uma série de tecnologias de projeto e operação de forma a reduzir os impactos ambientais decorrentes da fase de implantação, operação e fechamento. Entre estes aspectos citam: sistema de drenagem de águas superficiais, impermeabilização inferior e superior, sistema de drenagem e tratamento de lixiviados e gases.

Um aspecto cada vez mais abordado na literatura refere-se a geotecnia destas áreas. Estudos geotécnicos em resíduos sólidos e aterros sanitários são temas abordados em diversas pesquisas na literatura. Determinação de índices físicos e modelos de predição foram abordados por autores como Sowers (1968), Sowers (1973), Marques (2001), Jucá (2003), Gomes e Caetano (2010), Denardin (2013), etc.

Contudo, as propriedades dos resíduos sólidos domésticos são de difícil interpretação e previsão, devido a heterogeneidade destes. Devido a isto, a maioria dos trabalhos estabelece relações e adaptações de teorias da mecânica dos solos.

No entanto, estas adaptações nem sempre são adequadas. Comportamentos físicos, como granulometria dos resíduos sólidos por exemplo, são muito diferentes em relação aos solos. Da mesma forma, efeitos de degradação biológica da matéria orgânica, comumente encontrada em aterros sanitários brasileiros, não possuem relação com teorias de mecânica dos solos clássicas.

Por isso, o desenvolvimento de metodologias geotécnicas específicas e apropriadas para resíduos sólidos vem sendo estudados na literatura. É um fator essencial para entendimento do comportamento geotécnico dos maciços de resíduos, proporcionando o prolongamento da vida útil dos aterros e reduzindo acidentes geotécnicos nestas estruturas.

Baseando-se nesta problemática, esta pesquisa visa propor uma metodologia para determinação da massa específica dos grãos dos resíduos sólidos domésticos, índice utilizado para cálculo de recalques diferenciais em aterros sanitários.

## **METODOLOGIA**

### *ÁREA DE ESTUDO*

O local de estudo foi o Aterro Sanitário Municipal de São Leopoldo. O Aterro está em fase de monitoramento, pois se encontra desativado em sua capacidade máxima.

O resíduo disposto no local possui idade de cerca de 10 anos, e a composição gravimétrica, destes, na época de aterramento, conforme Gomes et al. (2014), eram de: 72% Restos de alimentos putrescíveis; 10% Plásticos; 2% Papel; 2% Metal; 2% Vidro; 2% Embalagens Longa Vida e 10% outros.

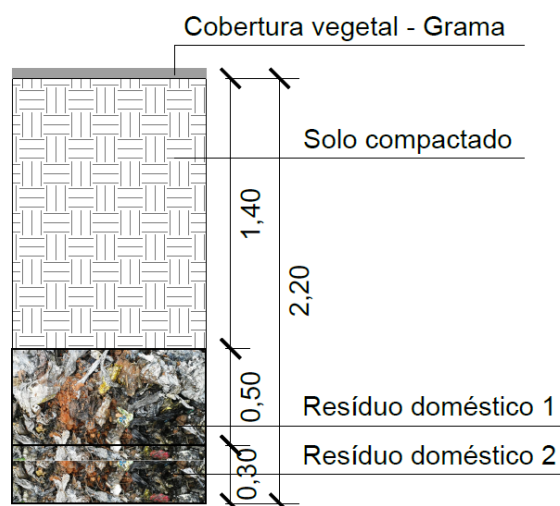
### *EXTRAÇÃO DA AMOSTRA*

A extração das amostras foi executada utilizando retroescavadeira (Figura 1).



**Figura 1: Remoção da amostra de RSD com auxílio de Retroescavadeira**

Foram coletadas 02 amostras de resíduos sólidos domiciliares em diferentes profundidades, que posteriormente dividiram-se em 10 amostras para ensaios laboratoriais. A remoção da amostra de RSD ocorreu em condições climáticas estáveis com temperatura aproximada de 25°C. Após escavação de 1,40m de profundidade de solo compactado encontrou-se o resíduo aterrado. Na profundidade de 0,50m de escavação após o aparecimento do resíduo, coletou-se a primeira amostra. Escavado mais 0,30m; coletou-se a segunda amostra. O esquema apresentado na Figura 2 demonstra as profundidades em que o resíduo amostrado encontrava-se e as camadas de cobertura do aterro sanitário.



**Figura 2: Esquema demonstrativo das profundidades das amostras**

As amostras foram transportadas em tonéis devidamente vedados à umidade externa e instalados em local apropriado no Laboratório de Construção Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, para realização posterior dos ensaios.

#### **CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA**

A caracterização da amostra foi realizada com base nos requisitos exigíveis de amostragem de resíduos sólidos apresentados na norma ABNT NBR 10007:2004 – Amostragem de resíduos sólidos.

### DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

A metodologia para determinação da massa específica dos resíduos sólidos domésticos seguiu uma adaptação da ABNT NBR 6508 (1984). No item de resultados e discussão apresenta-se estas adaptações.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

A amostra de RSD coletada era heterogênea em sua composição, porém encontrava-se altamente compactada, sendo difícil a separação dos RSD devido aos anos de aterramento em Aterro Sanitário.

Seguindo a NBR 10007 (ABNT, 2004), primeiramente foi separada uma porção significativa da amostra e pesada. Após foi realizado o quarteamento da mesma, ou seja, foi dividida em 04 partes, relativamente iguais, tanto em volume quanto em composição de resíduos sólidos. Foi separada uma parte para pesagem e caracterização. As demais partes foram descartadas.

A parte escolhida foi pesada e dividida por tipo de resíduo, ou seja, plástico, metal e etc, cada tipo foram pesados separadamente. As Figuras 3 e 4 apresentam o processo realizado neste ensaio.



**Figura 3: Primeira porção de amostra separada**



**Figura 4: Quarteamento da amostra**

Após a caracterização, fez-se a compilação com as características da amostra (Tabela 1). Graficamente, a Figura 5 apresenta os dados compilados.

**Tabela 1: Caracterização da amostra em laboratório**

Peso Inicial:		4,0475g
Quarteamento (1/4):		899,70g
Resíduos:	Plástico	554,40g
	Borracha	85,50g
	Metal	60,20g
	Têxtil	17,80g
	Matéria Orgânica	181,80g
Total		899,70g

Obs.: a porção de matéria orgânica é uma fração pastosa da amostra, muito deteriorada.

Uma comparação com a composição gravimétrica na época do aterramento apresenta por Gomes et al. (2014), percebe-se uma redução significativa de matéria orgânica, proveniente da degradação dos resíduos nestes últimos 10 anos.

#### DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

A determinação do teor de umidade seguiu a metodologia e conceitos adaptados de Mecânica dos Solos (VARGAS, 1977). O ensaio foi executado no Laboratório de Saneamento Ambiental da UNISINOS. Utilizou-se a amostra na íntegra. Tomou-se, apenas o cuidado da amostra apresentar dimensões compatíveis com as cápsulas de porcelanas utilizadas.

Foram ensaiadas 02 amostras, sendo 01 da amostra de h=0,50m e 01 da amostra de h=0,80m. As amostras foram pesadas em sua forma natural, úmidas, em uma balança modelo M214Ai, de capacidade máxima 210 g e mínima de 10 mg, d=0,1 mg, e identificadas em cápsulas cerâmicas. Após este processo o resíduo doméstico foi seco a uma temperatura de 65°C, em uma estufa durante 48 horas. Já que as amostras apresentavam-se com grande variação de umidade, estas permaneceram por mais 48 horas em estufa sob mesma temperatura.

Posteriormente, as amostras foram retiradas da estufa e colocadas em um dessecador por aproximadamente 30 minutos. Este procedimento foi executado até obtenção de peso constante.

O teor de umidade foi calculado através das equações 1 e 2.

$$P\omega = (G1 - G2) \quad (1)$$

Onde:  $P\omega$  = peso da água da amostra (g);  $G1$  = massa da amostra natural, úmida;  $G2$  = massa da amostra seca a 65°C.

$$\omega = \frac{P\omega}{Ps} 100 \quad (2)$$

Onde:  $\omega$  = umidade da amostra a 65°C (%);  $P\omega$  = peso da água da amostra (g);  $Ps$  = peso da amostra seca (g).

A amostra com profundidade de 0,50m apresentou uma umidade de 95%, enquanto a amostra com 0,80m apresentou uma umidade de 106,43%. Estes índices de umidade estão coerentes com outros estudos apresentados na literatura, como: 40%-95% (Carvalho, Vilar e Kaimoto, 2000); 146,10% (Marques, 2001); 72%-144% (Nascimento, 2007).

#### DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Para determinação da massa específica real dos grãos, desenvolveu-se um método para adaptação da norma ABNT NBR 6508 (1984): Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – determinação de massa específica, de mecânica dos solos.

Para explanação quanto à adaptação do método, cabe uma breve conceituação. Segundo Vargas (1977) os solos apresentam três fases, sendo elas o ar, a água e os sólidos. O autor apresenta ainda um esquema que demonstra os volumes ocupados por estas fases (Figura 23). O volume dos poros do solo é determinado  $V_v$ , que é a diferença entre o volume total pelo volume de sólidos ( $V_v = V - V_s$ ). Assim, com base nestes conceitos desenvolveu-se a metodologia para determinação de massa específica dos Resíduos Sólidos Domiciliares. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Saneamento Ambiental da UNISINOS.

A primeira etapa do ensaio consistiu em secar a amostra em estufa, temperatura 65°C, por 96 horas. Durante este processo houve o monitoramento do resíduo, verificando se o mesmo estava perdendo a umidade. No momento em que a amostra ficou seca, ela foi removida da estufa. Na Figura 5 estão as amostras separadas para o ensaio de determinação de massa específica.



**Figura 5: Amostras destinadas ao ensaio de massa específica**

Os ensaios foram realizados em duplicata. Para a pesagem foi utilizada uma balança da marca Toledo, série 10943891, modelo 2098/61, capacidade mínima de 200g e máxima de 60kg. Os ensaios foram realizados em ambiente com temperatura 20°C.

Na segunda etapa foram pesadas todas as vidrarias utilizadas, a massa da vidraria vazia e a massa da água e vidraria. A Figura 6 ilustra esta etapa. Devido as condições controladas do ensaio, considerou-se 1kg de água igual a 1L de água.



**Figura 6: Pesagem e identificação de vidraria para ensaio**

A terceira etapa foi à adição do resíduo seco, com peso conhecido, ao recipiente. Após, acrescentou-se água até o resíduo estar totalmente submerso, até a borda da vidraria. Os RSD ficaram submersos em água por 24 horas em temperatura ambiente 20°C, para saturação. Após este tempo, completou-se com água o recipiente até a borda, e os mesmos foram pesados. A Figura 7 demonstra este processo.



Figura 7: RSD submerso em água

Estas etapas permitiram determinar o volume do resíduo amostrado. Com isso, o valor de massa específica do resíduo foi obtido por meio da equação 3.

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s} \quad (3)$$

Onde:  $\gamma_s$  = massa específica real dos grãos ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $P_s$  = peso do resíduo seco (g);  $V_s$  = volume de água dentro da vidraria ( $\text{cm}^3$ ).

Os resultados massa específica obtidos estão coerentes com a literatura, embora esta utilize a metodologia normativa ABNT NBR 6508 (1984). A amostra com profundidade de 0,50m apresentou uma massa específica real dos grãos de  $1,09 \text{ g}/\text{cm}^3$ , enquanto a amostra com 0,80m apresentou uma massa específica real dos grãos de  $1,17 \text{ g}/\text{cm}^3$ . Outras pesquisas apresentaram índices de:  $2,36 \text{ g}/\text{cm}^3$  (Carvalho, Vilar e Kaimoto, 2000);  $0,49 \text{ g}/\text{cm}^3$  (Marques, 2001);  $1,107 \text{ g}/\text{cm}^3$  -  $1,50 \text{ g}/\text{cm}^3$  (Silveira, 2004);  $1,73 \text{ g}/\text{cm}^3$  -  $2,03 \text{ g}/\text{cm}^3$  (Nascimento, 2007).

Cabe, no entanto a observação de que há variação entre estudos devido a heterogeneidade de resíduos, tempo de aterramento, profundidade de amostragem, entre outros. Por exemplo: 1 – Resíduo com 15 anos de aterramento (CARVALHO, VILAR E KAIMOTO, 2000); 2 – Resíduo de um aterro experimental construído em cima de um aterro existente (MARQUES, 2001); 3 – Resíduo com 06 a 12 meses de aterramento (SILVEIRA, 2004); 4 – Resíduo com 05 anos de aterramento (SILVEIRA, 2004); 5 – Resíduo novo (NASCIMENTO, 2007); 6 – Resíduo com 04 anos de aterramento (NASCIMENTO, 2007).

## CONCLUSÕES

O desenvolvimento da metodologia para determinação do peso específico real dos grãos proposto, merece destaque já que proporcionou uma avaliação mais real da amostra permitindo a utilização da amostra natural, com completa composição gravimétrica, possibilitando resultados precisos.

Os resultados mostraram que a umidade dos resíduos sólidos variou entre 95% e 106,43%. Já a massa específica real dos grãos obtida está entre  $1,09 \text{ g}/\text{cm}^3$  e  $1,17 \text{ g}/\text{cm}^3$ . Estes dados estão coerentes com valores encontrados na literatura, permitindo validar a metodologia proposta pela pesquisa.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6508: 1984. Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA (ABRELPE). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017. 74p.
3. BOSCOV, M. E. G. Geotecnia Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
4. BURTON, Simon A. Q.; WATSON-CRAIK, Irene A. Ammonia e nitrogen fluxes in landfill site: applicability to sustainable landfilling. *Wast Management & Research*. 16: 41-53, 1998.
5. CARVALHO, M. F.; VILAR, O. M.; KAIMOTO, L. S. A. Estudo de Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos. In: Solos e Rochas: Revista Latino-americana de Geotecnia. V. 23, n. 1. São Paulo, 2000.
6. CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos; LIBÂNIO, Paulo Augusto Cunha; LEITE, Valderi Duarte; SOUSA, José Tavares de. Capítulo 6: Tratamento e recirculação de lixiviados. In: FERREIRA, Andréia C.; CASTILHOS JÚNIOR, Armando Borges de; CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos; ANDREOLI, Cleverton Victorio; PAULA JÚNIOR, Durval Rodrigues de; BORGES, Eduardo Sales Machado; SOARES, Hugo Moreira; SOUSA, José Tavares de; MORAES, Luciana de Mattos; PINTO, Marcelo Texeira; FRANÇA, Milene; PONTES, Patrícia Procópio; LIBÂNIO, Paulo Augusto Cunha; BELLI FILHO, Paulo; PINTO, Rafael de Oliveira; GONÇALVES, Ricardo Franci; VAZOLLER, Rosana Filomena; CASSINI, Sérgio Túlio (Coordenador); LEITE, Valderi Duarte; LOPES, Wilton Silva. Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás. Rio de Janeiro: ABES, 2003. p. 166-196.
7. DENARDIN, G. P. Estudo dos recalques do aterro sanitário da central de resíduos do recreio – Minas do Leão/RS. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal De Santa Maria. Santa Maria, 2013. Disponível em: <[http://cascavel.ufsm.br/tede//tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=5554](http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=5554)>. Acesso em: 20 ago. 2016.
8. GOMES, L. P.; CAETANO, M. O. Municipal Solid Waste Sanitary Landfill Compressibility Study with Linear Regression Application. In: *Soils and Rocks*, São Paulo, 33(3): 145-157, 2010.
9. GOMES, L. P.; CAETANO, M. O.; MIRANDA, L. A. S. Ammoniacal nitrogen removal from sanitary landfill leachate by stripping process using a baffled reactor (2014). *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, v. 7, n. 1, p 19-32.
10. JUCÁ, JOSÉ FERNANDO THOMÉ. Disposição Final de Resíduos Sólidos urbanos no Brasil. Anais do IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos e V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Porto Alegre, 2003.
11. MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; DOURADO, K. A.; ROCHA, M. B.; LOPES, C. L. Estudo da compressibilidade de resíduos sólidos urbanos da região metropolitana de salvador – BA. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande, 2005. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes23/III-167.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2016.
12. MARQUES, A. C. M. Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2001. 408p. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-07082007-162407/pt-br.php>>. Acesso em: 06 set. 2016.
13. NASCIMENTO, J. C. F. Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.
14. PESSIN, Neide; SILVA, Arthur Roberto; CONTO, Suzana Maria de; PANAROTTO, Cláudia Teixeira; BEAL, Lademir Luiz. Concepção e implantação de células piloto de aterramento de resíduos sólidos. In: CASTILHOS JÚNIOR, Armando Borges de; LANGE, Lisete Celina; GOMES, Luciana Paulo; PESSIN, Neide. Alternativa de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos para pequenas comunidades. Florianópolis/SC: RiMa, ABES, 2002. p. 13 – 17.
15. RENO, S.; GIVAUDAN, J. G.; POULAIN, S.; DIRASSOUYAN, F. ; MOULIN, P. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*. 150: 468-493, 2008.
16. SANTOS, Luiz Anibal de Oliveira Santos (1994) Projeto Construção e Monitoramento de Aterro Sanitário Controlado e Recuperação de Lixões: Interfaces com a Geotecnia, Geologia, Hidrogeologia e Tecnologia de Linings. Anais do Simpósio Internacional de Destinação de Lixo, Salvador, Bahia, pp. 88-103.
17. SOWERS, G. F.; Settlement of waste disposal fills. In: Eighth international conference on soil mechanics and foundation engineering. Moscow, 1973. VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 1977.





**30° CONGRESSO ABES 2019**  
Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental



18. SOWERS, G. F. Foundation problems in sanitary landfills. In: Journal of the Sanitary Engineering Division: Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, Vol. 94, No. SA 1, p. 103-116. New York, 1968.