

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Avaliação de modelos de recalques baseados em funções matemáticas dependentes do tempo

Annik Frasso Corrêa Klink
Professora, IFMG, Rio de Janeiro, Brasil, annikfc@hotmail.com

Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk
Professora, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, anavanelk@gmail.com

Júlio César Silva
Professor, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, jcesarop@gmail.com

Nathália Bernardo do Amaral
Aluna do curso de Eng. Ambiental e Sanitária, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, nbnathalia23@gmail.com

Tainá Maria Fidelis Santana
Aluna do curso de Eng. Ambiental e Sanitária, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, tainafideles222@gmail.com

RESUMO: O presente trabalho tem como objetivo avaliar a compressibilidade de uma área da Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu (CTR-NI), localizado na região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro. Os valores dos recalques medidos durante 960 dias foram utilizados para realizar uma previsão de recalques em 50 anos utilizando dois modelos teóricos de previsão de recalques, o clássico modelo de Sowers e o modelo hiperbólico de Ling. O monitoramento geotécnico do vale III no CTR-NI consistiu na instalação de 58 marcos superficiais. As leituras foram feitas durante o período de 7/01/2015 a 24/08/2017. Com o monitoramento foram verificados deslocamentos verticais e horizontais, bem como deformações pouco significativas. Na análise comparativa das previsões de recalques utilizando os modelos de Sowers e Ling observou-se que os resultados apresentaram comportamento bastante semelhante, apesar de serem expressos por funções diferentes. Os dois modelos apresentaram uma tendência a estabilização dos recalques a partir de 2000 dias, ou seja, em aproximadamente 5 anos. Apesar de serem modelos simples de serem empregados apresentam resultados satisfatórios quando calibrados com dados reais de campos.

PALAVRAS-CHAVE: Recalques, Compressibilidade, Resíduos Sólidos, Aterros Sanitários, Modelos de Recalques.

ABSTRACT: The present work aims to evaluate the compressibility of an area of the Nova Iguaçu Sanitary Landfill, located in the metropolitan region of the city of Rio de Janeiro. The values of the settlements measured for 960 days were used to perform a prediction of settlements in 50 years using two theoretical models of compressibility, the classic Sowers model and the hyperbolic Ling model. The geotechnical monitoring of the valley III in CTR-NI consisted of the installation of 58 superficial marks. The readings were made during the period from 7/01/2015 to 24/08/2017. With monitoring, vertical and horizontal displacements were verified, the deformations both was considered insignificants. In the comparative analysis of the predictions of settlements using the models of Sowers and Ling it was observed that the results presented very similar behavior, although they are expressed in different functions. The two models showed a tendency to stabilize the settlements from 2000 days, that is, approximately 5 years. Although they are simple models to be employed, they present satisfactory results when calibrated with field data.

KEYWORDS: Settlements, Compressibility, Solid Waste, Sanitary Landfill, Settlements Models.



1 Introdução

As instalações de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos (RSU), são maximizadas visando sua viabilidade econômica, pois é difícil encontrar áreas disponíveis, principalmente nos grandes centros urbanos, como alertado por Pereira (2000). Devido às elevadas alturas que alcançam tais empreendimentos, o estudo da compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos é necessário, uma vez que contribui para aumentar o volume adicional de resíduos e a segurança do aterro sanitário.

Além destes requisitos existe a necessidade de estudar e entender o comportamento compressivo dos resíduos frente à heterogeneidade do material, à deformabilidade da massa de resíduos e à presença de grandes vazios. Os resíduos sólidos são conhecidos por serem um material compressível e sujeitos a grandes deformações, resultantes do processo de degradação bioquímica que ocorre no interior dos taludes. Com o passar o tempo, a geração de gases e lixiviados favorece a redução da altura das camadas de resíduos no aterro. (Espinace & Palma, 1999).

A compressibilidade de resíduos sólidos urbanos deve-se a processos de biodegradação, transporte de líquido e gases e mecânico que resultam na diminuição da fase sólida dos resíduos e variação nos deslocamentos dos maciços de RSU. O processo biodegradativo dos resíduos sólidos provoca a geração de novos vazios dentro da massa de resíduos no aterro sanitário e conseqüentemente a ocorrência de recalques. (Carvalho, 1999; Pereira, 2000; Simões, 2009, McDougall, 2011).

Os recalques são mecanismos úteis dentro de um projeto de aterro, porém trazem sérios transtornos quando são excessivos. Podem, no entanto produzir trincas e fissuras nas camadas de cobertura, danificar os sistemas de drenagem de lixiviados facilitando o vazamento de chorume, aumentar as pressões internas, acelerar as deformações verticais e horizontais, criar áreas de acúmulo de água, aumentar a erosão e assoreamento, causar saturação da massa de resíduos, aumentar a instabilidade nos aterros sanitários. Inviabilizando assim, a utilização do espaço pós-encerramento. (Pereira, 2000)

Já a previsão de recalques fornece uma estimativa do comportamento dos recalques à longo prazo. A previsão é realizada através da utilização de modelos matemáticos. A partir desses modelos e dos dados históricos medidos em campo é possível identificar a real capacidade de armazenamento do aterro, estimar custos de projeto, dimensionar a vida útil além de indicar problemas de instabilidade.

Por conta disso, o monitoramento e a previsão de recalques são ferramentas que contribuem para tornar mais eficiente a capacidade operacional, a estabilidade do talude, a diminuição dos custos com manutenção e pós-encerramento do projeto além de minimizar os impactos ao meio ambiente

O presente trabalho tem por objetivo prever os recalques a partir dos dados monitoramento em campo do aterro de Nova Iguaçu-RJ (CTR-NI). Para a realização deste estudo foram analisados os dados de monitoramento através de 8 marcos superficiais durante um período de 960 dias. O artigo faz uma análise da previsão de recalques utilizando dois modelos teóricos, o clássico modelo de Sowers (1973) e o modelo hiperbólico de Ling *et al.*, (1998).

2 Materiais e Métodos

2.1 Central de Tratamento de Nova Iguaçu (CTR Nova Iguaçu)

A área selecionada para o desenvolvimento dessa pesquisa foi a Central de Tratamento de Resíduos sólidos (CTR) Nova Iguaçu, localizado no distrito de Vila Cava, bairro de Adrianópolis, a cerca de 10km do centro urbano do município de Nova Iguaçu, pertencente a região Metropolitana do Rio de Janeiro.

A CTR-NI teve sua operação iniciada em 13 de fevereiro de 2003, ocupando uma área de 120 hectares. É o primeiro aterro sanitário licenciado no Estado do Rio de Janeiro e o primeiro do Brasil a ter um projeto de mitigação de gases de efeito estufa e geração de energia limpa a partir dos resíduos sólidos e venda de crédito de carbono aprovado através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). O aterro recebe os resíduos de Nova Iguaçu, Mesquita, Nilópolis, Queimados, São João de Meriti, além de grandes geradores, recebendo de 3.500 a 6.000 toneladas diárias.

O aterro é dividido em quatro vales (Vale I, Vale II, Vale III e Vale IV). A área em estudo está localizada no Vale III. Esta área recebeu resíduos do tipo domiciliar, limpeza pública, comercial e industrial (classe II), incluindo lodos de estações de tratamento, durante o período de novembro de 2006 a fevereiro de 2014.



2.2 Monitoramento

O monitoramento geotécnico do vale III no CTR-NI consistiu na instalação de 58 marcos superficiais. As leituras foram feitas pela equipe técnica da empresa que opera o aterro, mensalmente (Fozz Haztec CTR Nova Iguaçú). Foram selecionados 8 marcos superficiais e os dados analisados do período de 7/01/2015 a 24/08/2017, 960 dias encontram-se resumidos na tabela 1, Klink (2019). Os valores de altura inicial H_0 foram determinados diminuindo o valor da conta inicial do marco e da cota de referência das leituras.

Tabela 1 - Resumo das coordenadas, deslocamentos verticais e horizontais de 8 marcos superficiais

Marcos	Início das leituras: 07/01/2015			Fim das leituras: 24/08/2017			Desloc. Horiz. (m)
	N (m)	E (m)	Cota (m)	N (m)	E (m)	recalque (m)	
MS01	7491624,84	656505,72	9,01	7491723,25	656356,58	0,117	0,018
MS04	7491777,81	656391,05	14,76	7491777,76	656390,96	0,130	0,000
MS07	7491772,93	656369,64	18,92	7491772,85	656369,62	0,135	0,000
MS12	7491662,09	656301,89	19,44	7491666,27	656282,43	0,103	0,002
MS30	7491809,20	656301,51	33,97	7491809,14	656301,47	0,143	0,000
MS43	7491786,78	656276,99	37,27	7491786,72	656276,97	0,212	0,000
MS53	7491809,42	656259,11	41,42	7491708,39	656208,05	0,180	0,011
MS58	7491880,02	656226,17	49,17	7491729,74	656206,55	0,230	0,015

2.3 Calibração dos modelos de previsão de recalques

2.4 2.3.1 Sowers (1973)

Sowers (1973), assumiu que os recalques totais de um aterro sanitário podem ser divididos em duas parcelas, uma gerada pelas solicitações mecânicas e outra pela decomposição físico-química e biológica. Esse modelo considera as parcelas de compressão inicial, primária e secundária. O recalque total é a soma dessas parcelas, sua formulação é simples e conta com um número de parâmetros reduzidos.

Os recalques primários são relacionados ao incremento de carga e ocorrem de forma rápida (cerca de um mês) e os recalques secundários incluem os fenômenos de fluência e biodegradação e admite a linearidade do recalque com o logaritmo do tempo (Babu *et al.*, 2010). A expressão que representa a compressão secundária é:

$$S_s = C'_\alpha \times H_0 \times \log \frac{t_2}{t_1} \quad (1)$$

Onde:

S_s = recalque secundário; C'_α = coeficiente de compressão secundária; H_0 = espessura inicial da camada; t_1 = tempo para conclusão da compressão primária; t_2 = tempo de estimativa de recalque

A calibração do modelo de Sowers (1973) foi feita considerando (H_0) como a altura inicial do aterro registrada no início das medições menos a cota de fundo, o tempo inicial do processo de recalque secundário t_1 foi adotado como 1 dia, para validar matematicamente a equação e t foi considerado o intervalo de tempo em dias decorridos entre a primeira e a última leitura topográfica de cada marco superficial. Para este trabalho calculou-se apenas os recalques secundários, pois a área estava desativada desde 2014.

2.3.2 Ling *et al.* (1998)

O modelo hiperbólico de Ling *et al.*, (1998) incorpora em uma única equação as compressões primária e secundária com o tempo inicial correspondente ao tempo de início de monitoramento dos recalques. Utiliza



a magnitude do recalque final e taxa de recalque inicial como parâmetros-chave em sua formulação. O modelo é representado pela equação 2.

$$S = \frac{t}{\frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{S_{ult}}} \quad (2)$$

Onde:

S = recalque total; ρ_0 = taxa inicial de recalque ($St/\Delta t$) para $t=t_0$; t = diferença entre o instante considerado e o início das medidas ($t = t_i - t_0$); S_{ult} = recalque último esperado (tempo infinito).

O modelo de Ling *et al.*, (1998) foi calibrado a partir de uma análise de regressão linear onde os parâmetros de entrada foram t e S , que correspondem ao tempo e recalque lidos em cada marco superficial. Plotando-se curvas de dispersão t/S por t , e gerando assim as equações da reta que melhor se ajustaram a estas curvas foi possível obter os valores de velocidade inicial, ρ_0 , e recalque final S_{ult} para cada MS.

3 Resultados e discussão

3.1 Monitoramento dos recalques

A tabela 2 apresenta os resultados dos valores medidos em campo para cada marco. É importante notar que os recalques foram medidos entre 2015 e 2017 e o vale III foi fechado em 2014, portanto, esses recalques se devem exclusivamente aos processos de compressão secundária.

Tabela 2 – Resumo dos deslocamentos e deformações para os 8 MS

Marcos	Frequência das leituras	Início das leituras: 07/01/2015		Fim das leituras: 24/08/2017	
		H_0 (m)	Recal. Vertical (m)	Deslo Horiz. (m)	Deformação (%)
MS01	mensal	9,01	0,117	0,018	1,30
MS04	mensal	14,76	0,130	0,002	1,08
MS07	mensal	18,92	0,135	0,001	0,71
MS12	mensal	19,44	0,103	0,002	0,78
MS30	mensal	33,97	0,143	0,001	0,48
MS43	mensal	37,27	0,212	0,001	0,78
MS53	mensal	41,42	0,180	0,011	1,14
MS58	mensal	49,17	0,230	0,015	0,65

Através da análise dos resultados dos 8 marcos superficiais pode-se observar que os valores de recalques e deslocamentos horizontais, bem como as deformações sofridos pelo maciço são de baixa magnitude, variando entre 103 mm a 230 mm, os deslocamentos horizontais variaram entre 0 a 18 mm e as deformações verticais encontradas ficaram em um intervalo de 0,48% a 1,30%. É importante ressaltar que os valores dos recalques são referentes à compressão secundária, visto que o período de leitura analisado se iniciou um ano após uma pausa na operação do Vale III. Dados de recalques secundários de baixa magnitude foram encontrados em Correia (2017), van Elk *et al.*, (2018), van Elk *et al.*, (2019) no vazadouro de Marambaia. Após 8 anos de monitoramento os referidos autores apresentam dados de deformação máxima de menos de 1%. Bjarngard e Edgers (1990) e König & Jessberg (1997) destacaram a existência de dois estágios identificáveis de recalque secundário. O primeiro é atribuído a fenômenos viscosos, enquanto o segundo é devido ao início da biodegradação e à perda de massa associada. O máximo recalque observado foi o do marco superficial MS58 e o menor recalque observado foi o do marco superficial MS12 que correspondem respectivamente a 103mm e 230mm.

3.2 Previsão de recalques

O modelo de Sowers considera as parcelas de compressão inicial, primária e secundária, porém, o monitoramento englobou somente o período em que existiu compressão secundária. A figura 2 apresenta o resultado da calibração do modelo de Sowers (1973) utilizando os dados de recalques medidos durante um período de 960 dias dos marcos que obtiveram o menor e o maior valor de recalque, MS12 e MS 58, respectivamente.

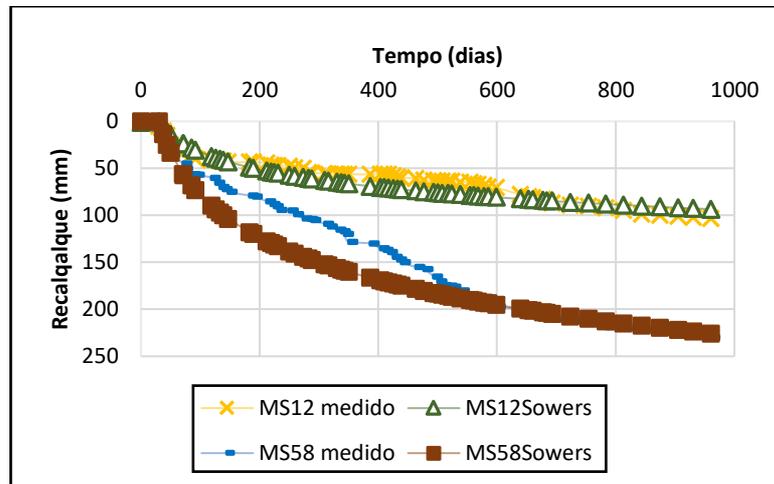


Figura 2 - Calibração do modelo de Sowers (1973)

Nota-se que os resultados entre valores previstos e medidos para os dois marcos superficiais estão aproximados, contudo, o marco MS12 obteve melhor aderência que o marco MS58. A figura 3 apresenta o resultado da previsão de recalques em 50 anos para os 8 Marcos Superficiais.

A longo prazo, o modelo de Sowers prevê um recalque mínimo de 147 mm no MS 12 e um recalque máximo de 330 mm no MS58. Observando o gráfico há uma queda na velocidade dos recalques a partir dos 2.000 dias, porém por se tratar de um modelo baseado em uma função logarítmica a curva não estabiliza com o avançar do tempo.

Ling *et. al.*, (1998) propõe uma função hiperbólica que utiliza a magnitude do recalque final e taxa de recalque inicial como parâmetros-chave em sua formulação. A calibração do modelo de Ling *et al.* (1998) consistiu na obtenção da velocidade inicial de recalques (ρ_0) e do recalque último (S_{ult}). A figura 4 apresenta o resultado da aplicação do modelo de Ling *et al.* (1998), para o período de 960 dias, com os dados dos marcos de menor e maior valores de recalque, o MS12 e MS 58, respectivamente.

Com base nos resultados da calibração, observa-se uma boa aderência entre os valores de recalques medidos e estimados durante todo o período. A figura 5 apresenta a previsão do modelo para os 8 MS em 50 anos.

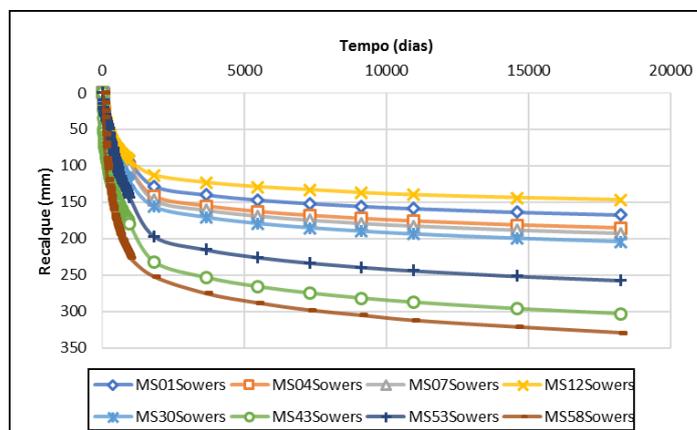


Figura 3 - Previsão do modelo de Sowers (1973) para 50 anos

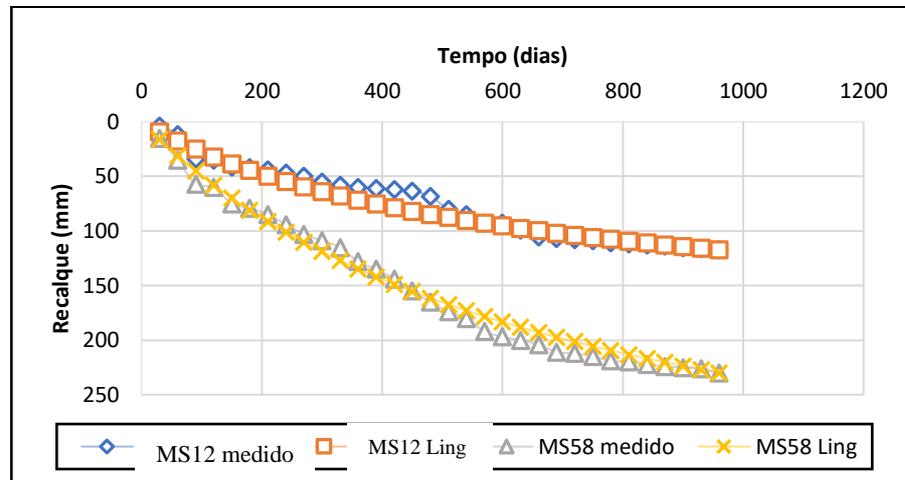


Figura 4 – Calibração do modelo de Ling *et al.* (1998)

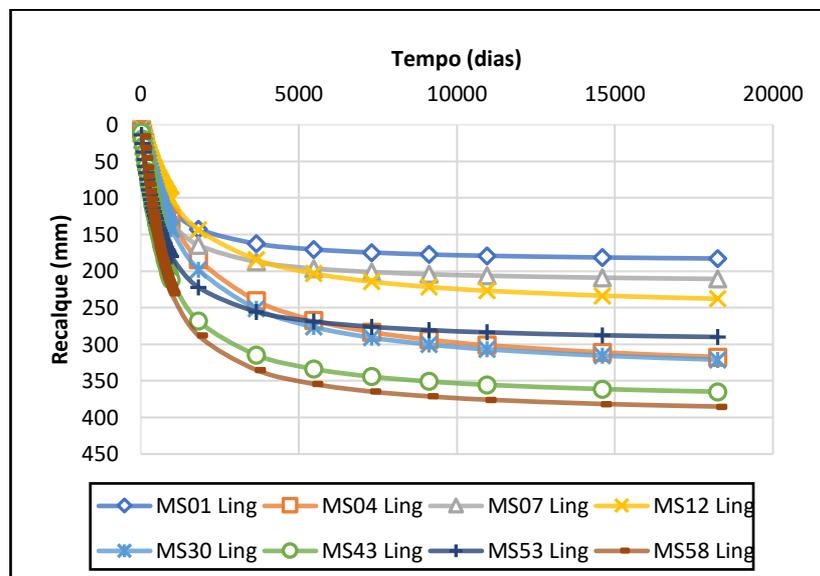


Figura 5 - Previsão do modelo de Ling *et al.* (1998) para 50 anos

A longo prazo o modelo de Ling prevê um recalque mínimo de 183 mm com o MS 1 e um recalque máximo de 385 mm com o MS58. Nota-se uma tendência a estabilização do maciço de resíduos a partir de 4.000 dias para os marcos MS01 e MS07 e de 5000 para os marcos restantes. A figura 6 apresenta os resultados de previsão de recalques dos dois marcos superficiais MS12 e MS58 obtidos através dos modelos de Sowers (1973) e Ling *et al.*, (1998).

Na análise comparativa das previsões, os modelos de Sowers (1973) e Ling *et al.* (1998) apresentaram comportamento bastante aproximado. Os dois modelos apresentaram uma tendência a estabilização dos recalques a partir de 2000 dias, ou seja, aproximadamente em 5 anos.

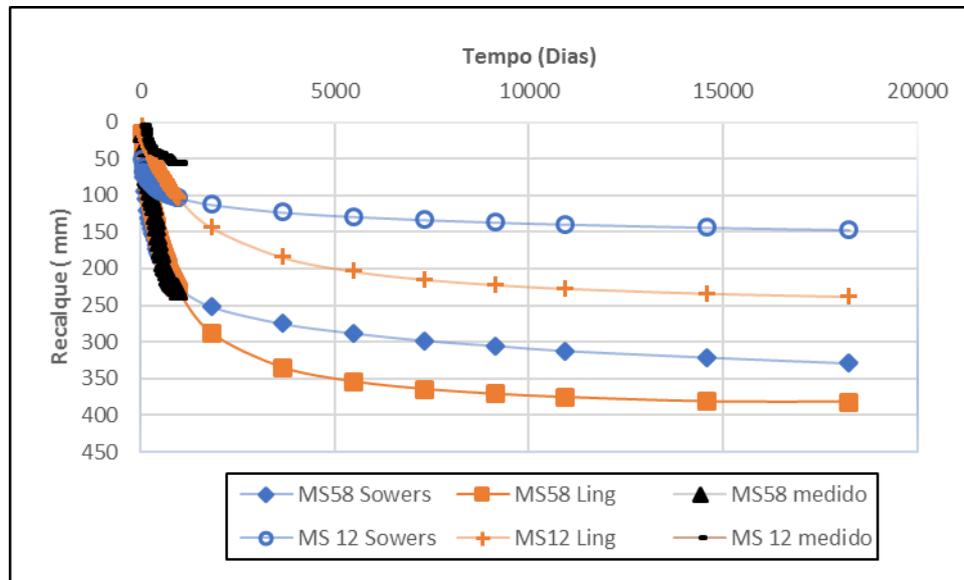


Figura 6 - Previsão de Recalques com os modelos de Sowers (1973) e Ling *et al.* (1998) em 50 anos

4. Conclusão

Neste estudo foi apresentado resultados de um monitoramento de recalques no Vale III do CTR-NI durante 960 dias. Tais dados serviram de base para previsão de recalques a longo prazo utilizando dois modelos matemáticos de compressibilidade.

Os resultados de recalques sob carga constante foram pouco significativos, demonstrando a possibilidade de que os maiores recalques podem ocorrer durante a operação do aterro e/ou no primeiro ano após o encerramento das atividades na área.

Os modelos baseados em funções que dependem do tempo, como chamado por McDougall (2013), são modelos que incorporam em uma única função todos os fenômenos que ocorrem em um aterro sanitário, como é o caso dos modelos de Sowers (1973) e Ling *et al.*, (1998). O modelo de Sowers, apesar do autor ter explicado conceitualmente os processos de recalques em resíduos, na equação que expressa os recalques secundários não há uma distinção de recalques por fluência e por biodegradação, todos os tipos de recalques secundários estão incorporados em uma única equação. O mesmo ocorre com o modelo de Ling *et al.*, (1998) que utiliza uma função hiperbólica para representar o comportamento das curvas de recalques. Ambos modelos são simples e fáceis de serem utilizados e representam bem o comportamento dos recalques em campo, no entanto, apresentam melhores resultados quando calibrados com dados reais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a obtenção dos dados ao Diogo Barbosa Arantes, gerente operacional e Caio Dias Martini Alves, supervisor de projetos e operações da Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu, empresa HAZTEC Tecnologia e Planejamento Ambiental SA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Babu, G. L. Sivakumar; Reddy, K. R.; Chouskey, S. K.; Kulkarni, H. S. (2010). Prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement using constitutive model. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management. ASCE 139 p. 139-150.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



- Carvalho, M. F. (1999). *Comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos*. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 301p.
- Correia, L.R. (2017). *Análise de recalques a longo prazo no antigo vazadouro de Marambaia*, Nova Iguaçu – RJ. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 100p.
- Bjarngard, a., e Edgers, L. (1990). Settlement of municipal solid waste landfills. *Proc.13th Annual Madison Waste Conf.*, Univ. of Wisconsin, Madison, Wisconsin, p.192–205.
- Edil, T. B. Ranguete, V.J. E Wuellner, W. (1990). Settlement of municipal refuse – *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*. ASTM STP 1070, Arvid Landva & David Knowles, (eds), pp. 225-239.
- Espinace, R., Palma J., (1990) Problemas Geotécnicos de los Rellenos Sanitarios, Revista Ingeniería Civil del CEDEX, N°77, Edición Octubre, Noviembre y Diciembre de 1990, Madrid, España
- Konig, D. & Jessberg H.L. (1997) Report of the Technical Committee 5 (*Environmental Geotechnic*). Sub Comittee 3 (Waste mechanics). International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – ISSMGE, Hamburgo, p.35-5.
- Klink, A. F. C. (2019). *Previsão de recalques em aterros sanitários utilizando modelos de compressibilidade: estudo de caso da Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu-RJ*. Programa de Mestrado em Engenharia Ambiental (PEAMB), Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 101p.
- Ling, H.I., Leshchinsky, D., Mohri, Y. & Kawabata.1998. Estimation of municipal solid waste landfill settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(1): 21 - 28.
- McDougall, J. 2011. Settlements: the long and the short of it. In: geotechnical characterization, field measurement and laboratory testing of municipal solid waste, ASCE Geotechnical Special Publication, p. 76-111.
- Pereira, A.G.H. (2000) *Compresibilidad de los residuos sólidos urbanos*. Tesis Doctoral. Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Universidad de Oviedo, Oviedo, España. 281p.
- Sowers, G. F. (1973). Settlement of waste disposal fills. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, [s.n.]. Moscow, p. 207–210.
- Simões, G.F. e Catapreta, C.A.A. (2009). Settlement Monitoring at Belo Horizonte Sanitary Landfill, Brazil. Proceedings Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium. Sta Margherita di Pula, Sardinia, Italy.
- van Elk, A.G.H.P., Azevedo, G.S.; Correia, L.R. & Ritter, E. (2018). Análise dos deslocamentos verticais e horizontais do vazadouro de Marambaia. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Cobramseg, 2018. Salvador, Ba.
- van Elk, A.G.H.P.; Correia, L.R. & Ritter, E. (2019). Análise dos recalques em longo prazo no vazadouro de Marambaia. *Revista da Engenharia Sanitária* vol 24. n. 3 mai/jun 547 -557.