

III-468 – AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DOS RECALQUES DE LONGO PRAZO NO ATERRÔ SANITÁRIO DE BELO HORIZONTE, MG

Thiago Henrique Ribeiro Silvério⁽¹⁾

Estudante de Engenharia Ambiental (UFMG).

Natália Melo da Silva

Estudante de Engenharia Ambiental (UFMG).

Maria Lygia Torres Barbosa

Estudante de Engenharia Ambiental e Sanitária (CEFET-MG).

Cícero Antonio Antunes Catapreta

Eng. Civil (PUCMG), Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG), Professor Adjunto da PUC Minas (PUCMG). Engenheiro Sanitarista da Superintendência de Limpeza Urbana de Belo Horizonte, MG, Brasil.

Gustavo Ferreira Simões

Eng. Civil (UFMG), Mestre e Doutor em Engenharia Civil (PUC-Rio), Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil

Endereço⁽¹⁾: Superintendência de Limpeza Urbana de Belo Horizonte – SLU/BH. Departamento de Tratamento e Disposição Final de Resíduos. Rodovia BR 040 – Km 531 – Jardim Filadélfia - Belo Horizonte – MG. Brasil - Tel: (31) 3277-9810 – e-mail: catapret@pbh.gov.br

RESUMO

A ocorrência de recalques em aterros sanitários pode ser significativa, chegando a mais de 40% em relação à sua altura inicial, e devem ser considerados tanto na fase de operação quanto após o encerramento das atividades de aterragem de resíduos. Subestimar essas deformações pode resultar na necessidade de trabalhos extensivos para obter um perfil de superfície adequado para o uso final pretendido, bem como pode resultar na perda de espaço para aterragem de resíduos. Diversos são os fatores que definem as deformações em aterros sanitários, assim como são complexos uma vez que os resíduos sólidos são formados por materiais naturais e/ou artificiais de várias categorias. Esses materiais variam em forma e volume de acordo com as suas propriedades de degradação e deformação, que podem influenciar nas condições estruturais dos aterros sanitários e gerar instabilidade na massa de resíduos disposta nestes aterros. Considerando isso, o presente trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia empregada e a análise dos resultados que vêm sendo obtidos no monitoramento de recalques superficiais no Aterro Sanitário de Belo Horizonte, MG, cujos dados vêm sendo obtidos há cerca de 16 anos. Os resultados são analisados considerando principalmente a relação entre idade e altura inicial dos resíduos e as deformações específicas observadas. Foram analisados cerca de 130 medidores instalados nos taludes do aterro sanitário de Belo Horizonte, e os resultados obtidos mostram que a velocidade de recalques até a data de encerramento das atividades de aterragem de resíduos nesse aterro era significativa, diferentemente após esse período, observou-se uma redução considerável dessa variável. Notou-se também que aterro já reduziu cerca de 10,74% de sua altura ao longo de todo esse período de monitoramento.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros Sanitários, Resíduos Sólidos, Recalques, Monitoramento, Lixo.

INTRODUÇÃO

Atualmente, no Brasil, a disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) no solo, por exemplo, em aterros sanitários, é o método mais utilizado para a destinação final desses resíduos. Sabe-se que um aterro sanitário é um projeto de engenharia que requer planejamento, projeto, construção e operação eficiente, visando reduzir os impactos que podem ser gerados e proporcionar uma boa operação dessas unidades.

Um dos fatores mais importantes que afetam o período de operação e pós-operação de um aterro sanitário são as deformações que podem ser observadas na massa de resíduos disposta, face à complexidade dessas unidades de disposição, onde são observados vários processos – físicos, químicos e biológicos – que ocorrem, simultaneamente, por muitos anos, de forma contínua.

As deformações, ou recalques, em aterros de RSU continuam por vários anos após o fechamento, sendo que a taxa e a magnitude desses recalques pode ser influenciada por muitos fatores, incluindo o tempo após a disposição, espessura das camadas de resíduos, altura do aterro, composição dos resíduos, aspectos relacionados às condições iniciais de disposição (peso específico, teor de umidade e índice de vazios), presença de material biodegradável, nível de lixiviado, teor de umidade, temperatura e presença de gases no aterro. Os recalques de RSU também podem ocorrer devido ao seu próprio peso e cargas externas, que podem incluir camadas adicionais de resíduos, cobertura final e possíveis cargas de construção no atero. O mecanismo principal de ocorrência de recalques, geralmente, inclui (Yen e Scanlon, 1975):

- Processos de adensamento semelhantes aos que ocorrem nos solos (expulsão do fluido de poros e reorientação de partículas);
- Movimento de finos em espaços vazios maiores;
- Perda de material causada por degradação bioquímica (decomposição) e/ou mudanças físico-químicas.

Estimativas de recalques totais de aterros sanitários variam de 25 a 50 % (Wall & Zeiss, 1999). Segundo Ling *et al.* (1998), os recalques finais dos aterros sanitários podem ser de 30 a 40% da altura inicial, ao longo de sua vida útil.

Entende-se que o recalque de aterros é irregular, mas geralmente exibe muitas características semelhantes a solos orgânicos coesivos, especialmente turfas (Oweis e Khera, 1990, Sharma e Lewis, 1994). Modelos analíticos de previsão baseados em conceitos gerais de mecânica dos solos foram propostos por Gibson e Lo (1961), Sowers (1968, 1973), Yen e Scanlon (1975), Rao *et al.* (1977), Morris e Woods (1990), Landva e Clark (1990) e outros. Edil *et al.* (1990), Bjargard e Edgers (1990), Fassett *et al.* (1994) e Stulgis *et al.* (1995) propuseram modelos para prever os recalques de RSU com base na avaliação dos dados de desempenho de aterros medidos em campo.

Deve-se considerar também que uma quantidade considerável de recalques ocorre devido à decomposição de RSU em aterros durante um longo período de tempo. Portanto, o efeito da decomposição biológica rege as características de recalques a longo prazo dos aterros de resíduos sólidos municipais.

Assim, considerando o exposto, o presente trabalho tem objetivo apresentar e discutir os resultados do monitoramento de recalques que vem sendo realizado no atero sanitário de Belo Horizonte.

MATERIAL E MÉTODOS

ATERRO SANITÁRIO DE BELO HORIZONTE

O atero sanitário de Belo Horizonte se localiza na região Noroeste do município, e esteve em operação por um período de 32 anos (1975 – 2007). Ao longo dos anos de operação, a disposição de RSU ocorreu em 8 áreas distintas, abrangendo uma área de aproximadamente 70 hectares. Esse atero ocupa uma área de 144 hectares, sendo que 65 hectares consistem de áreas em que houve disposição de RSU, onde foi aterrado um volume de cerca de 23 milhões de toneladas de resíduos, os quais foram compactados com tratores de esteiras, em camadas sucessivas, sobrepostas, com 5 m de altura cada e atingiu 65 m altura em sua elevação final. Nas Figuras 1 e 2 pode ser observada a localização do atero sanitário de Belo Horizonte.

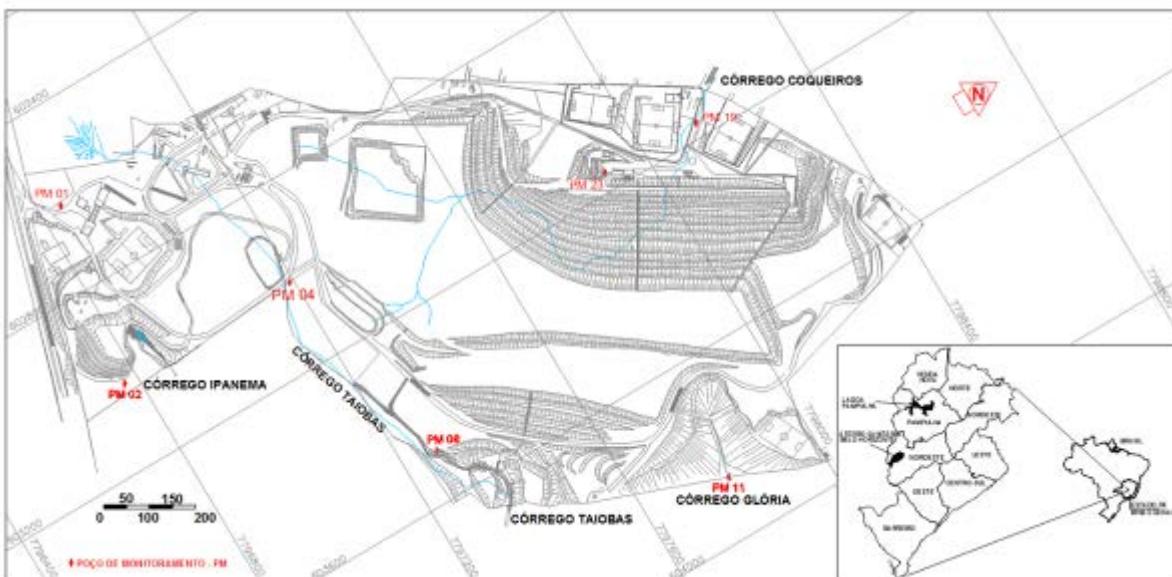


Figura 1 - Aterro Sanitário de Belo Horizonte, MG



A
B
Figura 2 – Vista aérea do aterro sanitário de Belo Horizonte

CARACTERÍSTICAS DOS RSU

A composição gravimétrica média (em base úmida) dos RSU dispostos no aterro foi: matéria orgânica (62%); papel e papelão (10%); plásticos (11%); metais (2%); vidros (3%); resíduos de construção e demolição - RCD (3%); borracha, espuma e materiais cerâmicos (1%); madeira, tecidos e couro (4%) e outros (5%). Observa-se que, mesmo dentro dos resíduos sólidos domésticos, a presença de entulho, em proporções reduzidas. Outros constituintes estão dentro das faixas normalmente observadas para cidades semelhantes à Belo Horizonte. Destaca-se o alto teor de matéria orgânica presente (62%), o qual propiciou um teor de umidade inicial em torno de 60% (base úmida).

MEDIDA DE RECALQUES

Os recalques superficiais são mensurados por meio de leituras realizadas em medidores específicos, formados por uma base de concreto, instalada entre o topo dos resíduos e a camada de cobertura final, e uma haste de aço. Os recalques foram medidos por meio de nívelamento geométrico de precisão utilizando estação total e prisma ótico. A distribuição dos medidores ocorreu de modo que se observassem os recalques em quase todas as células do aterro e a frequência de leitura é quinzenal.

Os medidores são instalados a uma profundidade aproximada de 50 cm da superfície dos taludes. Desta forma, as constantes movimentações de terra que acontecem no topo das bermas não interferem nos registros. Atualmente encontram-se instalados 130 medidores permanentes, distribuídos nas células do aterro, principalmente nas bermas dos taludes.

RESULTADOS

Os resultados apresentados e discutidos a seguir referem-se à análise de dados do monitoramento realizado no aterro sanitário de Belo Horizonte, a partir de dados históricos de recalques observados nas células desse aterro. Os resultados se referem somente às leituras de alguns medidores, cujos resultados se mostraram mais significativos em quantidade de leituras e deformações observadas. De um total de 130 medidores existentes, foram analisados 86 medidores (denominados PRs), sendo que, destes, foram selecionados 21 medidores: três na Célula AC-01, cinco na célula AC-03, seis na célula AC-04 e sete da célula AC-05, cuja localização é apresentada na Figura 3.



Figura 3 – Localização dos medidores de recalques analisados

Foi analisado um período de, aproximadamente, 16 anos (2002-2018), sendo que os recalques medidos se referem ao período em que o aterro sanitário estava em operação (1.834 dias), até dezembro de 2007, e pós-encerramento, até 2018. Na Figura 4 é apresentada, graficamente, a evolução temporal dos recalques observados, enquanto que a Tabela 1 apresenta dados de alguns medidores, cujas leituras se mostraram mais significativas.

Destaca-se que a data de encerramento das atividades é apenas uma referência, já que, como há resíduos de diversas idades dispostos em locais variados do maciço de resíduos, não há como proceder a uma análise geral dos recalques por medidor e sua relação com essa data. Ou seja, a data de instalação dos medidores de recalques é diferente da data de final de enchimento daquela camada.

Logo, os dados apresentados e comentados não consideram o recalque primário, que ocorre imediatamente após a disposição dos resíduos no aterro sanitário, e que, segundo relatado na literatura, são responsáveis pelas maiores velocidades de recalques as quais tendem a diminuir em função do tempo de aterrimento. Esses recalques são consequência da aplicação de cargas mecânicas para adensamento dos resíduos, no momento da compactação. Além disso, como houve um intervalo de tempo entre o término da disposição e o início do monitoramento de recalques, parte do recalque de longo prazo não pode ser computado.

Os dados resultantes do monitoramento foram compilados em tabelas e planilhas eletrônicas e analisados de forma isolada nesse trabalho, considerando todas as hipóteses e condições de contorno específicas do aterro sanitário de Belo Horizonte.

Como pode ser observado, já foram registrados recalques superiores a quase 7,0 m, que correspondem a deformações da ordem de 10% em alguns pontos. Se forem considerados os percentuais mencionados na literatura, descritos anteriormente, esses valores ainda são baixos. Cumpre destacar que o conhecimento da

idade e da altura (ou espessura) inicial da camada de resíduos sob cada medidor permite uma comparação mais adequada dos padrões observados nos recalques.

Contudo, ao longo dos anos, após o encerramento das atividades, foram realizadas reconformações do topo e algumas bermas e taludes do aterro sanitário utilizando solos, no intuito de regularizá-lo, visando à eliminação de depressões causadas pelas deformações (recalques). Além disso, parte dos recalques de longo prazo também não foram incluídos, tendo em vista que a instalação dos medidores e o início do monitoramento de recalques não tiveram início imediatamente após a conclusão das camadas. Isso pode indicar que os recalques são superiores àqueles observados.

De maneira geral, verifica-se que os recalques absolutos e as velocidades de ocorrência destes variam, consideravelmente, de medidor para medidor e em função do período de monitoramento destes. Destaca-se que o acompanhamento, entendimento e estimativa dos recalques e das velocidades dos recalques dos maciços sanitários são importantes para garantir a integridade e o bom funcionamento dos sistemas estruturais deste (sistemas de cobertura e impermeabilização; drenagem superficial e de efluentes). Em alguns casos, esses parâmetros também são utilizados para determinar a vida útil do aterro.

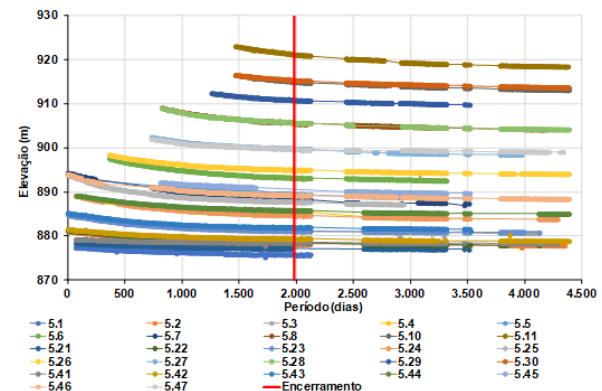
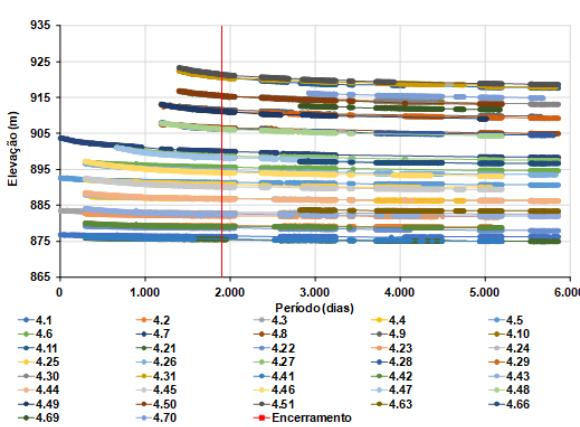
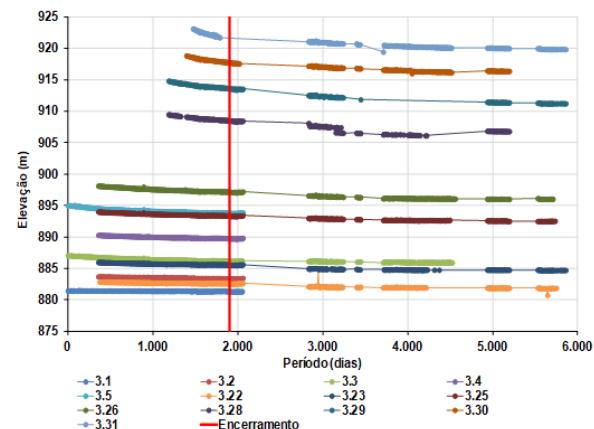
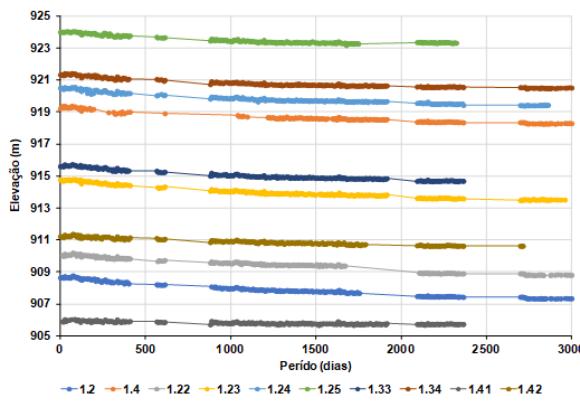


Figura 4 - Evolução Temporal de recalques observadas em medidores instalados no aterro sanitário de Belo Horizonte, MG (2002-2018).

Em termos de recalques totais observados nos períodos avaliados, as Células AC-03 e AC-04, antes do encerramento, apresentaram uma deformação maior que após o encerramento, sugerindo que pode estar já havendo uma redução considerável dos processos biológicos de decomposição da matéria orgânica ali depositada.

Contudo, como destacado, anteriormente, os medidores não foram instalados imediatamente após a aterragem de resíduos naquele ponto, não considerando o recalque primário e parte do recalque de longo prazo, indicando

que, de fato, os recalques serão superiores aos apresentados. Análise nesse sentido, referente a uma célula desse aterro, foi apresentada por Silva *et al* (2011).

Tabela 1 – Recalques observados em medidores instalados no aterro sanitário de Belo Horizonte, MG

Célula	Medidor	Tempo (dias)			Leitura Inicial	Leitura no Encerramento	Leitura Final	Recalque Observado até encerramento	Recalque observado após encerramento	Recalque Total	Velocidade até o encerramento	Velocidade após o encerramento
		Até Encerramento	Após Encerramento	Total	(m)						(mm/d)	
AC-01	1.22	-	2.986	2.986	910,04	-	908,80	-	1,237	1,237	-	0,4141
	1.23	-	2.960	2.960	914,76	-	913,51	-	1,252	1,252	-	0,4228
	1.24	-	2.862	2.862	920,50	-	919,43	-	1,068	1,068	-	0,3731
AC-03	3.26	1.548	3.795	5.343	898,13	897,12	896,05	1,017	1,066	2,083	0,6571	0,5489
	3.28	721	3.283	4.004	909,49	908,48	906,79	1,004	1,688	2,693	1,3926	0,8201
	3.29	714	3.946	4.660	914,83	913,59	911,23	1,238	2,357	3,595	1,7339	0,9110
	3.30	511	3.283	3.794	918,85	917,70	916,38	1,149	1,322	2,471	2,2493	0,7526
	3.31	434	3.028	3.462	923,13	921,72	919,85	1,405	1,875	3,281	3,2382	1,0834
AC-04	4.7	1.906	3.883	5.789	903,71	900,08	898,38	3,636	1,697	5,333	1,9079	0,4370
	4.11	468	3.498	3.966	922,44	920,69	917,67	1,744	3,020	4,765	3,7271	0,8634
	4.31	511	3.854	4.365	922,43	920,57	917,91	1,861	2,661	4,522	3,6417	0,6906
	4.46	1.616	3.220	4.836	897,32	894,10	893,15	3,218	0,949	4,167	1,9915	0,2946
	4.47	1.246	3.220	4.466	901,11	898,24	896,65	2,875	1,586	4,461	2,3077	0,4924
	4.51	511	3.883	4.394	923,31	921,38	918,66	1,928	2,719	4,647	3,7726	0,7003
AC-05	5.4	1.910	1.532	3.442	889,04	885,39	883,91	3,649	1,483	5,131	1,9104	0,9677
	5.5	1.980	1.532	3.512	893,88	889,39	888,54	4,486	0,844	5,330	2,2657	0,5509
	5.6	1.616	1.328	2.944	897,58	893,11	892,47	4,466	0,647	5,113	2,7637	0,4873
	5.7	1.980	1.526	3.506	894,26	888,21	887,28	6,053	0,929	6,981	3,0569	0,6086
	5.24	1.910	2.302	4.212	889,07	884,61	883,79	4,455	0,825	5,280	2,3324	0,3585
	5.25	1.980	952	2.932	893,90	887,64	887,12	6,262	0,515	6,777	3,1628	0,5411
	5.46	1.980	2.400	4.380	893,96	889,17	888,37	4,789	0,801	5,590	2,4186	0,3337

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, conclui-se que o acompanhamento sistemático das movimentações ocorridas na massa de resíduos disposta nas células monitoradas permitiu avaliar os recalques nelas ocorridos. Apesar dos problemas encontrados, principalmente no que diz respeito às leituras em campo, os dados são consistentes de forma a confirmar a veracidade dos resultados obtidos.

Os resultados indicam que já foram registrados recalques superiores a quase 7,0 m, que correspondem a deformações da ordem de 10% em alguns pontos. Contudo, esses recalques podem ser maiores, já que na análise não foi possível considerar o recalque primário e parte dos recalques de longo prazo, tendo em vista que os registros não tiveram início imediatamente após a conclusão das camadas.

Os resultados que vêm sendo obtidos no monitoramento de recalques do aterro sanitário de Belo Horizonte têm contribuído para o aprimoramento técnico e um melhor conhecimento das variáveis geotécnicas que influenciam o comportamento dos aterros de disposição de RSU.

Embora uma correlação direta entre os recalques e as diversas variáveis intervenientes nos processos ainda não possa ser obtida, a análise dos registros permite a definição de faixas de deformações esperadas, que podem contribuir para avaliação permanente do comportamento geotécnico de aterros sanitários em condições brasileiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bjarngard, A. E.; Edgers, L. Settlements of municipal solid waste landfills. In: Annual Madison Waste Conference, 13, 1990, Madison, USA, *Proceedings...* Madison, 1990, pp. 192-205.
2. Edil, T. B.; Ranguete, V. J.; E Wuellner, W. W. Settlement of Municipal Refuse. In: Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice. Philadelphia: ASTM, pp 225–239, 1990.
3. Fasset, J. B.; Leonards, G. A.; Y Repetto, P. C. Geotechnical properties of municipal solid wastes and their use in landfill design. In: Landfill Technology Conference - WasteTech '94, 1994, Charleston, South Caroline/USA. *Proceedings...* Charleston: National Solid Waste Management Association, 1994.
4. Gibson, R. E; LO, K. Y. A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression. In: Norwegian Geotechnical Institute Publications, n. 41, pp.1-16, 1961
5. Landva, A. O.; Clark, J. I. Geotechnics of waste fill. In: Geotechnics of Waste Fill - Theory and Practice. Philadelphia, PA: ASTM, pp. 86–106, 1990.
6. Ling, H. I.; Leshchinsky, D.; Mohri, Y. E.; Kawabata, T. Estimation of municipal solid waste landfill settlement. In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 124, n. 1, pp. 21-28, 1998.
7. Sharma, H. D.; E Lewis, S. P. Waste Containment Systems, Waste Stabilization and Landfills – Design and Evaluation. New York: John Wiley and Sons, 1994, 608 p.
8. Sowers, G. F. Settlement of waste disposal fills. In: International Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering, 8, 1973. Moscow, RU. *Proceedings....* Moscow, 1973. Part 2
9. Yen, B. C.; Scanlon, B. S. Sanitary landfill settlement rates. In: Journal of the Geotechnical Engineering Division, v. 101, n. GT5, pp. 475-487; 1975.
10. Stulgis, R. P., Soydemir, C., and Telgener, R.J. (1995). "Predicting Landfill Settlement." *Geoenvironment 2000*, ASCE, Geotechnical Special Publication No.46, 980 - 994.
11. Morris, D. V. and Woods, C.V. (1990). "Settlement and Engineering Considerations in Landfill and final Cover Design." *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, 9 - 21.
12. Oweis, I. S. and KhERA, R. P. (1990). "Geotechnology of Waste Management." Butterworths, London, England.
13. Rao, S. K., Moulton, L. K., and Seals, R. K. (1977). "Settlement of refuse landfills." *Geotechnica Practice for Disposal of Solid Waste Materials*, Geotech. Engrg. Div. ASCE.
14. Wall, D. K. e Zeiss, C. Municipal landfill biodegradation and settlement. *Journal of Environmental Engineering*, v. 121, n. 3, pp. 214-224, 1995.
15. Silva, F. H. R., Simões, G. F., Catapreta, C. A. A. Calibração de um modelo acoplado mecânico e biológico para a previsão de recalques em um aterro sanitário baseado em dados de monitoramento. In: REGEO'2011 - VII Congresso Brasileiro de Geotecnica Ambiental, 2011, Belo Horizonte. Anais do VII Congresso Brasileiro de Geotecnica Ambiental - REGEO'2011. São Paulo/SP: ABMS, 2011