

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

MODELAGEM DE RECALQUES DE LONGO PRAZO DE UM ATERRO SANITÁRIO EXPERIMENTAL – ANÁLISE CRÍTICA DE TRÊS MODELOS EMPÍRICOS

* Michelle Granha Giorgini ¹
Cícero Antônio Antunes Catapreta ²
Gustavo Ferreira Simões ³

MODELING OF LONG-TERM SETTLEMENTS OF AN EXPERIMENTAL SANITARY LANDFILL – CRITICAL ANALYSIS OF THREE EMPIRICAL MODELS

Recibido el 12 de junio de 2019; Aceptado el 4 de mayo de 2020

Abstract

One of the tools used for the estimation of long-term settlements of landfills is the use prediction models. Estimation of settlements and their rates are relevant to determine the landfill lifespan, since municipal solid wastes present large settlements. Settlement prediction is extremely complex, due to material heterogeneity and the various mechanisms involved in the process. This paper presents a continuation of the study by Simões and Catapreta (2013), in which data of 6 years of settlement monitoring of the experimental landfill of Belo Horizonte were used to predict long term settlements with three models (rheological, hyperbolic and composite), comparing the results with actual field data of 13 years. In addition, a new calibration of the models was performed with data of 13 years. The parameters obtained in the calibration were used to predict the settlements of another 20 years. The results confirmed the need of using long periods of monitoring records to predict values closer to those observed in field. The results for the long-term settlement prediction obtained by the hyperbolic and rheological models significantly underestimate the settlements, regardless the period of data used in the calibration. The best fits were obtained with the composite model.

Keywords: landfill, monitoring, municipal solid waste, settlements, settlements model.

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, Brasil.

² Superintendência de Limpeza Urbana-SLU, Belo Horizonte-MG, Brasil.

³ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte-MG, Brasil

*Autor correspondente: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Escola de Engenharia da UFMG, Bloco 1, Sala 4527, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha – 31270-901 - Belo Horizonte – MG – Brasil. Email: michellegranhagiorgini@gmail.com

Resumo

Uma das ferramentas utilizadas para a estimativa de recalques a longo prazo em aterros sanitários são os modelos de previsão de recalques. A estimativa de recalques e as velocidades com que eles ocorrem são importantes na determinação da vida útil dos aterros, tendo em vista que os resíduos sólidos urbanos sofrem grandes recalques. A previsão de recalques em aterros sanitários é extremamente complexa por se tratar de materiais heterogêneos com propriedades variáveis no tempo e aos diferentes mecanismos envolvidos no processo. Este artigo apresenta a continuação do estudo realizado por Simões e Catapreta (2013), no qual foram utilizados registros de 6 anos de monitoramento de recalques no aterro sanitário experimental de Belo Horizonte para previsão de recalques de longo prazo, utilizando três modelos (reológico, hiperbólico e composto), e comparando com os registros atuais de 13 anos de monitoramento. Além disso, uma nova calibração dos modelos foi realizada com os registros de 13 anos. Os parâmetros obtidos na calibração foram usados para prever os recalques de mais 20 anos. Os resultados confirmaram a necessidade de utilização de longos períodos de registros de monitoramento para a previsão de valores mais próximos aos observados em campo. Os resultados para a previsão de recalques a longo prazo obtidos pelos modelos hiperbólico e reológico subestimaram significativamente os recalques, independentemente do período de registros utilizado na calibração. Os melhores ajustes foram obtidos com o modelo compósito.

Palavras chave: aterro sanitário, modelos de recalque, monitoramento, recalques, resíduos sólidos urbanos.

Introdução

A geração de resíduos sólidos é uma das grandes preocupações ambientais do mundo moderno. Com o crescimento populacional e o avanço da industrialização, o homem passou a consumir cada vez mais produtos menos duráveis e/ou descartáveis, acarretando no aumento da quantidade de resíduos gerados. Juntamente com esse crescimento populacional, surgem demandas por infraestrutura, tais como gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (GRSU). Um dos principais problemas desse gerenciamento, principalmente na etapa de disposição final, é que os resíduos sólidos urbanos (RSU) são materiais extremamente heterogêneos e de comportamento geomecânico e hidráulico complexo.

Sob o ponto de vista geotécnico, a principal característica dos RSU, que dificulta a avaliação do seu comportamento, é a biodegradabilidade, que tem como consequência a constante alteração de suas propriedades geomecânicas e hidráulicas. Dentre os aspectos que merecem destaque citam-se os recalques, que constituem um sério problema do ponto de vista geotécnico.

A estimativa dos recalques e o seu monitoramento em aterros sanitários são importantes, pois permitem, por exemplo: a determinação da real capacidade de armazenamento e a vida útil do aterro sanitário, fator importante na gestão de resíduos; o desenvolvimento de estudos para o reaproveitamento do local após o fechamento; a avaliação da estabilidade geotécnica dos taludes; e o desempenho da cobertura final, pois esta pode ser prejudicada por trincas oriundas dos recalques diferenciais, o que consequentemente aumenta a infiltração da água da chuva, podendo comprometer a estabilidade do aterro (Sowers, 1973; Park *et al.*, 2002; Boscov, 2008; Teixeira e Pinheiro, 2018).

Estimativas de recalques totais de aterros sanitários variam de 25 a 50 % (Wall e Zeiss, 1995; Edgers *et al.*, 1992). Segundo Ling *et al.* (1998), os recalques finais em um aterro sanitário podem ser de 30 a 40% da altura inicial, ao longo de sua vida útil.

A identificação dos mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento de recalques em aterros de disposição de RSU é de extrema importância para a interpretação do comportamento, proposição de modelos de previsão e realização de simulações.

A previsão de recalques em aterros de RSU é difícil devido à ampla gama de fatores de influência. McDougall (2011) discute de forma abrangente os principais fatores que influenciam os recalques em aterros sanitários. Estes incluem: composição de resíduos e porcentagem do material degradável; peso específico, índice de vazios e teor de umidade iniciais; dimensões do aterro; métodos de compactação; sequência de enchimento do aterro; pré-tratamento de resíduos (incineração, compostagem, mistura e fragmentação); nível e flutuação dos líquidos lixiviados no interior do aterro; temperatura; existência de sistemas de coleta e extração de gases; características da cobertura final; clima; e história de tensões, envolvendo todas as etapas de operação e após o fechamento.

Segundo Liu *et al.* (2006), os modelos existentes para avaliação de recalques de aterros sanitários podem ser divididos nas seguintes categorias: (1) Modelos baseados nas expressões da teoria de adensamento de Terzaghi, que são normalmente aplicados no cálculo de recalques primário e secundário em solos; (2) Modelos Reológicos, onde o comportamento de compressão de resíduos é modelado com utilização de conceitos e parâmetros reológicos dos materiais; (3) Modelos de Biodegradação, nos quais a biodegradação da matéria orgânica é considerada na formulação; (4) Modelos de Regressão que utilizam funções comuns, tais como logarítmicas, hiperbólicas, potência, bi-linear, multi-linear etc.

McDougall (2011) apresenta ainda uma ampla revisão dos mecanismos e fatores influentes, bem como um histórico da evolução dos modelos de previsão. O autor destaca que grande parte dos modelos disponíveis são os chamados modelos dependentes do tempo, que utilizam diversos tipos de funções matemáticas, e que não incorporam, em geral, as interações de longo prazo entre os fatores que controlam a evolução dos recalques, em especial a parcela da biodegradação. Mesmo com essas limitações, os modelos dependentes do tempo vêm sendo estudados, principalmente por sua simplicidade.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar a continuação de um estudo realizado por Simões e Catapreta (2013), no qual foram utilizados registros de 6 anos de monitoramento de recalques no aterro sanitário experimental de Belo Horizonte para previsão de recalques de longo prazo, utilizando três modelos dependentes do tempo (reológico,

hiperbólico e compósito). As previsões de longo prazo, realizadas por Simões e Catapreta (2013), são comparadas aos registros atuais, de aproximadamente 13 anos de monitoramento. Em seguida, uma nova calibração foi realizada com conjuntos de registros de campo de 13 anos de monitoramento, com o objetivo de obter parâmetros para o conjunto total de registros obtidos e, a partir deste, simular uma previsão de recalques para um período de 20 anos.

Metodologia

O trabalho foi desenvolvido no aterro sanitário experimental implantado na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da BR 040 – CTRS BR 040, em Belo Horizonte.

O aterro sanitário experimental foi implantado entre os anos de 2004 e 2005 e possui uma área de aproximadamente 5.260m² e uma altura total de 3.80m, sendo 3.20m de resíduos e 0.60m de cobertura final. Foram dispostos nesse aterro cerca de 8.600t de RSU o que corresponde a um volume de 11.550m³.

O aterro experimental foi dividido em seis células, as quais foram preenchidas com o mesmo tipo de resíduo, mas submetidas a diferentes condições de compactação. A energia de compactação de campo (número de passadas do equipamento compactador) e inclinação da face de trabalho foram variados para obter diferentes pesos específicos iniciais para cada célula. A tabela 1 apresenta os pesos específicos iniciais para as 6 faixas do aterro.

Tabela 1. Pesos específicos iniciais para as 6 faixas do aterro.

	Faixas					
	1	2	3	4	5	6
Peso Específico (kN.m ³)	7.3	5.8	8.1	8.2	8.1	8.0

O projeto e a construção deste aterro experimental foram realizados visando a uniformidade da composição dos resíduos. A composição gravimétrica média dos RSU dispostos em todas as faixas do aterro foram: matéria orgânica: 62%; papel e papelão: 10%; plásticos: 11%; metais: 2%; vidros: 3%; resíduos de construção e demolição: 3%; borracha, espuma e cerâmica: 1%; madeira, têxteis e couro: 4%; e outros: 5%.

A Figura 1 mostra a localização da CTRS BR 040, em relação à cidade de Belo Horizonte e do aterro sanitário experimental. Detalhes do projeto, construção e do programa de monitoramento do aterro sanitário experimental são descritos em Catapreta (2008).

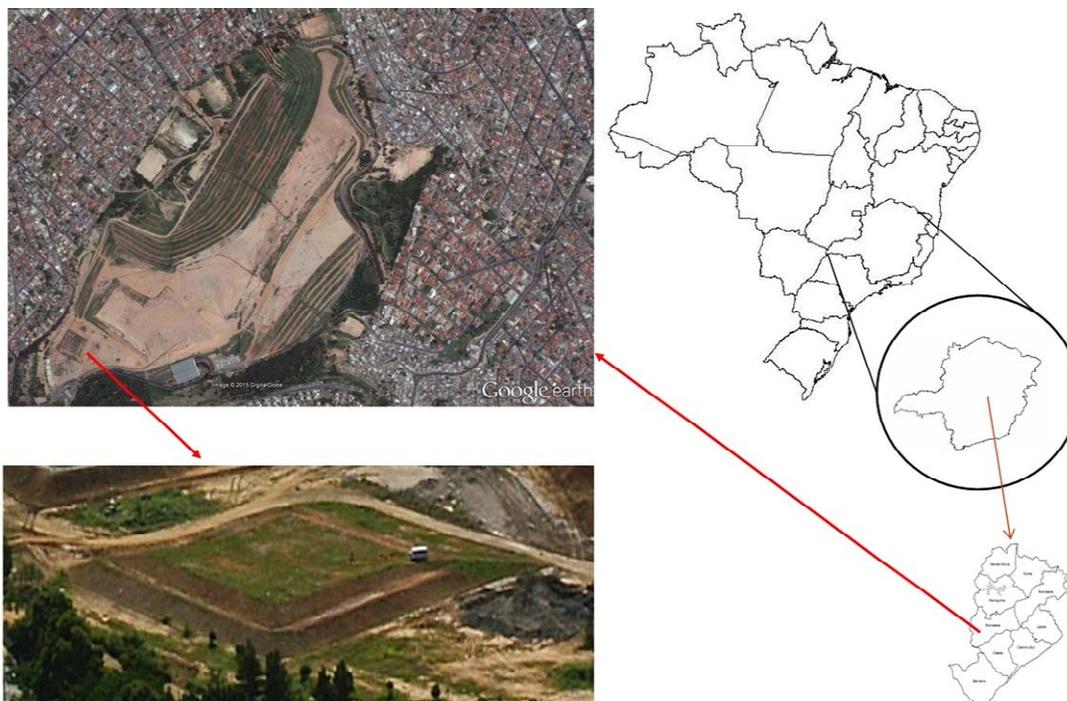


Figura 1. Localização da CRTS BR-040 e vista aérea do Aterro Sanitário Experimental.

Para o monitoramento dos recalques do aterro sanitário experimental, foram instalados 18 medidores de recalques superficiais, distribuídos nas 6 faixas. Os medidores foram instalados no contato entre os resíduos e a camada de cobertura final. A Figura 2 mostra a localização desses medidores. Neste trabalho foram utilizados os registros de aproximadamente 13 anos, correspondendo ao período de junho de 2005 a dezembro de 2018.

Levando-se em conta as propriedades geotécnicas e a homogeneidade do solo sob o aterro experimental, associadas às baixas tensões induzidas pelo aterro experimental, os recalques de longo prazo da fundação não foram considerados.

A Figura 3 apresenta as deformações observadas em campo nos 18 medidores de recalques, que variaram entre 36 e 48%, no período de 13 anos. Essa grande variação observada é reflexo da heterogeneidade dos resíduos, bem como dos diferentes pesos específicos iniciais de cada faixa associados aos diferentes mecanismos que ocorrem em pontos distintos do aterro sanitário experimental.

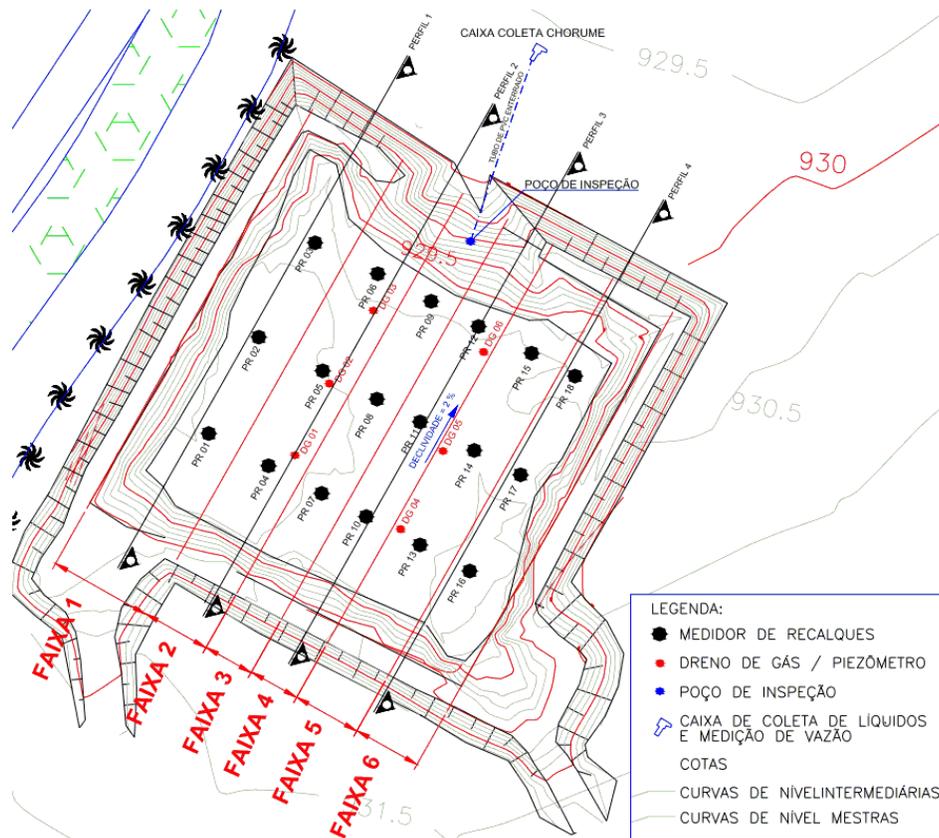


Figura 2. Localização dos medidores de recalque no aterro sanitário experimental (Catapreta, 2008).

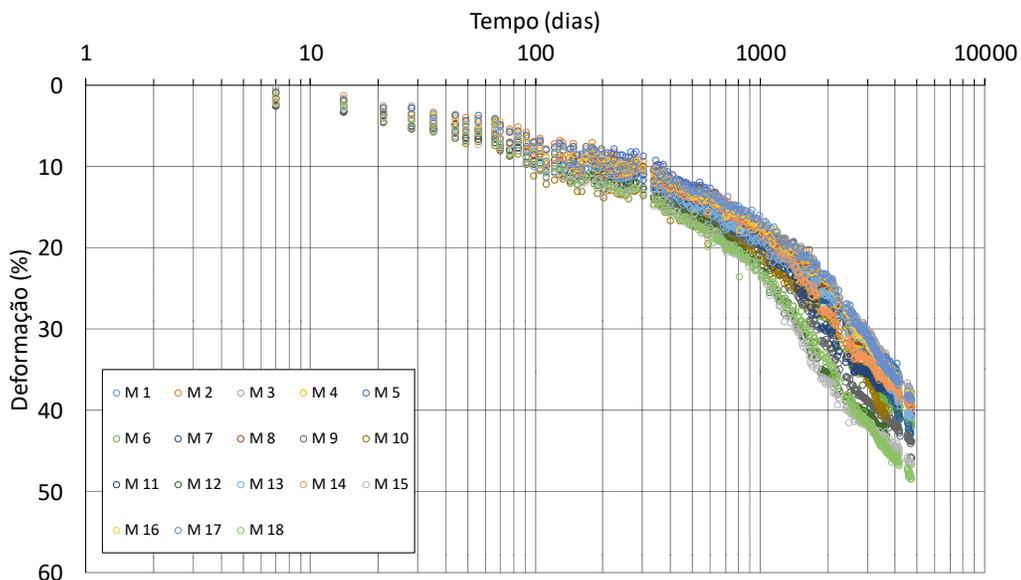


Figura 3. Deformações observadas em campo.

Modelos de previsão de recalques de longo prazo avaliados

Três modelos empíricos de previsão de recalques de longo prazo foram utilizados para avaliar o comportamento do Aterro Sanitário Experimental de Belo Horizonte. Os modelos utilizados são descritos a seguir.

Modelo Hiperbólico

Ling *et al.* (1998) analisando as limitações dos modelos de Yen e Scanlon (1975) e Edil *et al.* (1990), propuseram a utilização de uma função hiperbólica para a estimativa de recalques em aterros de resíduos sólido urbanos. O modelo é descrito pela Equação (1).

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

Em que:

t = diferença entre o instante considerado e o início das medidas ($t = t_i - t_0$)

S = diferença entre o recalque no instante considerado e o recalque inicial ($S = S_i - S_0$)

ρ_0 = taxa ou velocidade inicial de recalques

S_{ult} = recalque final

Modelo Reológico

Edill *et al.* (1990) propuseram um modelo visco-elástico linear baseado no modelo reológico de Gibson e Lo (1961), utilizado para avaliação da compressão secundária em solos turfosos e orgânicos. O modelo associa em série um elemento de Hooke (mola com constante a), que simula a compressão primária do resíduo, a um elemento Kelvin, traduzido pela associação em paralelo de um elemento de Hooke (mola com constante b) e um elemento de Newton (amortecedor com viscosidade λ/b), que simula a compressão secundária do elemento.

Após a aplicação de um incremento de tensão, que pode ser originado pelo peso próprio do resíduo ou de cargas aplicadas na superfície, a mola de constante a, se comprime instantaneamente, de maneira análoga à compressão primária. A compressão do elemento Kelvin é retardada pelo amortecedor, de maneira similar à compressão secundária sob tensão efetiva constante. A carga é, então, transferida progressivamente para a segunda mola, de constante b. Após um certo tempo, toda a tensão efetiva será suportada pelas duas molas. Dessa forma, o recalque do resíduo pode ser avaliado pela Equação (2).

$$S(t) = H \cdot \Delta\sigma \left[a + b \left(1 - e^{-\frac{\lambda}{b}t} \right) \right] \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

S(t) = recalque no tempo

a e b = parâmetros de compressibilidade primária e secundária

λ/b = taxa de compressão secundária

H = altura inicial do resíduo

$\Delta\sigma$ = tensão de compressão

t = tempo após a aplicação da carga

Modelo Compósito

O Modelo Compósito apresentado por Marques (2001) distingue as fases de compressão mecânica primária, secundária e compressão biológica secundária, com leis físicas e parâmetros próprios. Nessas fases são considerados o incremento de tensões verticais, a fluência devida ao peso próprio e à sobrecarga, e a parcela devida ao processo de degradação dos resíduos, respectivamente.

Esse processo pode ser representado por três corpos reológicos. Eles seriam uma mola de Hooke de constante C_c (compressão mecânica primária); associada a um corpo de Kelvin (compressão mecânica secundária), representado pela associação em paralelo de um elemento de Hooke (mola com constante b) e um elemento de Newton (amortecedor de viscosidade c); e um terceiro corpo (compressão biológica secundária) representado pela associação em paralelo de um elemento de compressão finita (E_{dg}) e elemento de Newton (amortecedor de viscosidade d) (Marques, 2001). A representação do modelo Reológico Compósito é ilustrada na Figura 4.

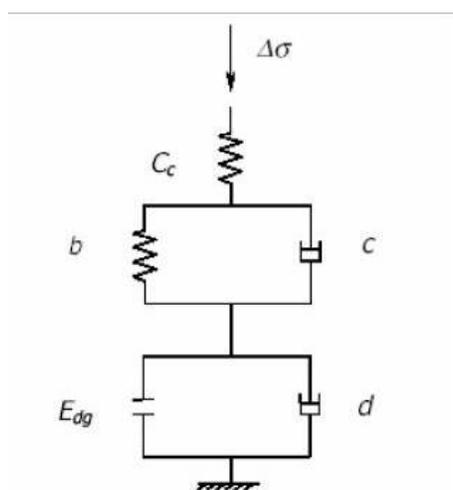


Figura 4. Modelo compósito (Marques, 2001).

Analiticamente, o modelo apresenta-se na Equação (3). A aplicação desse modelo está associada à sequência construtiva do aterro e hipóteses de tempo nas componentes de compressão dependentes desse parâmetro. O recalque total é acumulativo, derivado da superposição dos efeitos sobre cada camada.

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} = C_c \cdot \log\left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}\right) + \Delta\sigma \cdot b \cdot (1 - e^{-c \cdot t}) + E_{dg} \cdot (1 - e^{-d \cdot t}) \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

ε = deformação

ΔH = recalque

H = altura da coluna de resíduos

C_c' = coeficiente de compressão mecânica primária

σ_0 = tensão vertical inicial

$\Delta\sigma$ = incremento de tensão vertical

b = coeficiente de compressão mecânica secundária

c = taxa de compressão mecânica secundária

Edg = compressão total devido à degradação dos resíduos

d = taxa de compressão biológica secundária

t' = tempo a partir da aplicação do carregamento

t'' = tempo a partir da disposição dos resíduos

Comparação entre registros de campo e recalques simulados

Simões e Catapreta (2013) apresentam um estudo utilizando a calibração dos três modelos de recalques apresentados, considerando os registros de campo observados durante os 6 primeiros anos de monitoramento do aterro sanitário experimental de Belo Horizonte. Os registros foram divididos em três períodos, correspondentes a 1, 3 e 6 anos de monitoramento. Com os parâmetros de calibração obtidos após 1 e 3 anos, simulações para 6 anos foram realizadas. Os parâmetros obtidos com registros de campo de 6 anos foram utilizados em outra simulação, para um período de 10 anos.

O estudo de Simões e Catapreta (2013) mostrou que todos os modelos subestimaram significativamente os recalques no sexto ano, quando foi considerado apenas calibração com 1 ano de registros de campo. Utilizando registros de campo de 3 e 6 anos na calibração, os resultados dos modelos reológico e hiperbólico continuaram subestimando os recalques. Já o modelo compósito mostrou uma melhor concordância com os registros de campo.

Resultados

Para avaliação dos modelos e previsão de recalques, foi utilizado o sistema desenvolvido por Simões *et al.* (2005), o qual é formado por um conjunto de planilhas de calibração dos modelos, desenvolvido em ambiente Excel (Microsoft, 2003), utilizando a linguagem de programação Visual Basic, Macros e Otimização de Parâmetros. Os parâmetros de cada modelo são determinados a partir da minimização de uma função, denominada Desvio, que é definida como a soma dos quadrados das diferenças entre os valores reais medidos em campo e os calculados pelo modelo.

A calibração dos modelos reológico, hiperbólico e compósito foi realizada por Simões e Catapreta (2013), utilizando os registros de monitoramento do período de 6 anos. A Tabela 2 apresenta os parâmetros obtidos para cada modelo.

Tabela 2. Parâmetros obtidos na calibração utilizando registros de 6 anos (adaptado de Simões e Catapreta, 2013).

Faixa	Modelo Reológico			Modelo Hiperbólico			Modelo Compósito				
	Desvio	λ/b (dia ⁻¹)	b (kPa ⁻¹)	Desvio	ρ_0 (m.dia ⁻¹)	S_{ult} (m)	Desvio	b (kPa ⁻¹)	c (dia ⁻¹)	Edg	d (dia ⁻¹)
1	0.49	0.00151	0.0211	0.33	0.00149	1.0184	0.07	0.0266	0.0004	0.0685	0.0147
2	0.68	0.00121	0.0307	0.52	0.00132	1.2154	0.05	0.0700	0.0002	0.0711	0.0179
3	0.97	0.00162	0.0203	0.68	0.00180	1.0535	0.07	0.0446	0.0002	0.0902	0.0187
4	1.26	0.00146	0.0232	0.94	0.00182	1.2381	0.09	0.0644	0.0002	0.0953	0.0211
5	1.12	0.00141	0.0229	0.84	0.00168	1.2158	0.11	0.0584	0.0002	0.0897	0.0195
6	0.83	0.00157	0.0205	0.58	0.00171	1.0623	0.07	0.0402	0.0002	0.0870	0.0159

Neste artigo foram comparadas as previsões geradas com a calibração dos modelos, baseada em 6 anos de registros de campo, com os registros atuais, de aproximadamente de 13 anos de monitoramento. Foram utilizadas as deformações médias, obtidas a partir dos 3 medidores instalados em cada faixa de trabalho. Na Figura 5 são apresentados os resultados dessas comparações.

Pela Figura 5 pode ser observado que, apesar dos baixos desvios observados na calibração (Tabela 2), os modelos utilizados não foram capazes de prever corretamente as deformações para o período final de monitoramento de 13 anos, mesmo utilizando os registros de 6 anos na calibração, o que pode ser considerado um período extenso.

O modelo compósito foi o que apresentou melhor ajuste aos registros de campo, indicando uma tendência à estabilização mais lenta, a longo prazo. Isso retrata a capacidade de o modelo em incorporar, mesmo que de forma empírica, o fato de que alguns materiais orgânicos se degradam mais lentamente e, que o efeito dessa degradação, em termos de recalques poderá ser sentido somente em longo prazo. Portanto, a aplicação desse modelo indica um melhor resultado.

Os modelos Reológico e Hiperbólico não apresentaram resultados satisfatórios, pois os valores simulados sugerem que o aterro já estaria em fase de estabilização a partir do início do sétimo ano, o que não foi comprovado pelos registros atuais do monitoramento de recalques do aterro sanitário experimental.

Os resultados comprovam a necessidade de grandes históricos de monitoramento para a realização de calibrações e previsões de recalques mais precisas, confirmando as limitações dos modelos empíricos baseados no tempo para aplicações reais.

Além disso, embora os parâmetros obtidos nas calibrações estejam dentro de faixas encontradas por outros autores (e.g. Van Elk *et al.*, 2019), por se tratar de modelos empíricos dependentes do tempo, a comparação de cada parâmetro com outros obtidos em estudos semelhantes é muito

difícil, tendo em vista as diferentes composições dos resíduos dispostos, a escala dos aterros monitorados (lisímetro em laboratório - Korpff et al., 2017; lisímetro em campo - Coelho, 2005; experimental – Catapreta, 2008; e real – Van Elk et al., 2019) bem como o período de registros utilizado na calibração (dias, meses e anos). Observa-se de uma forma geral que os parâmetros dos modelos são utilizados exclusivamente na calibração e simulação de um mesmo aterro, não sendo extrapolados para outras situações.

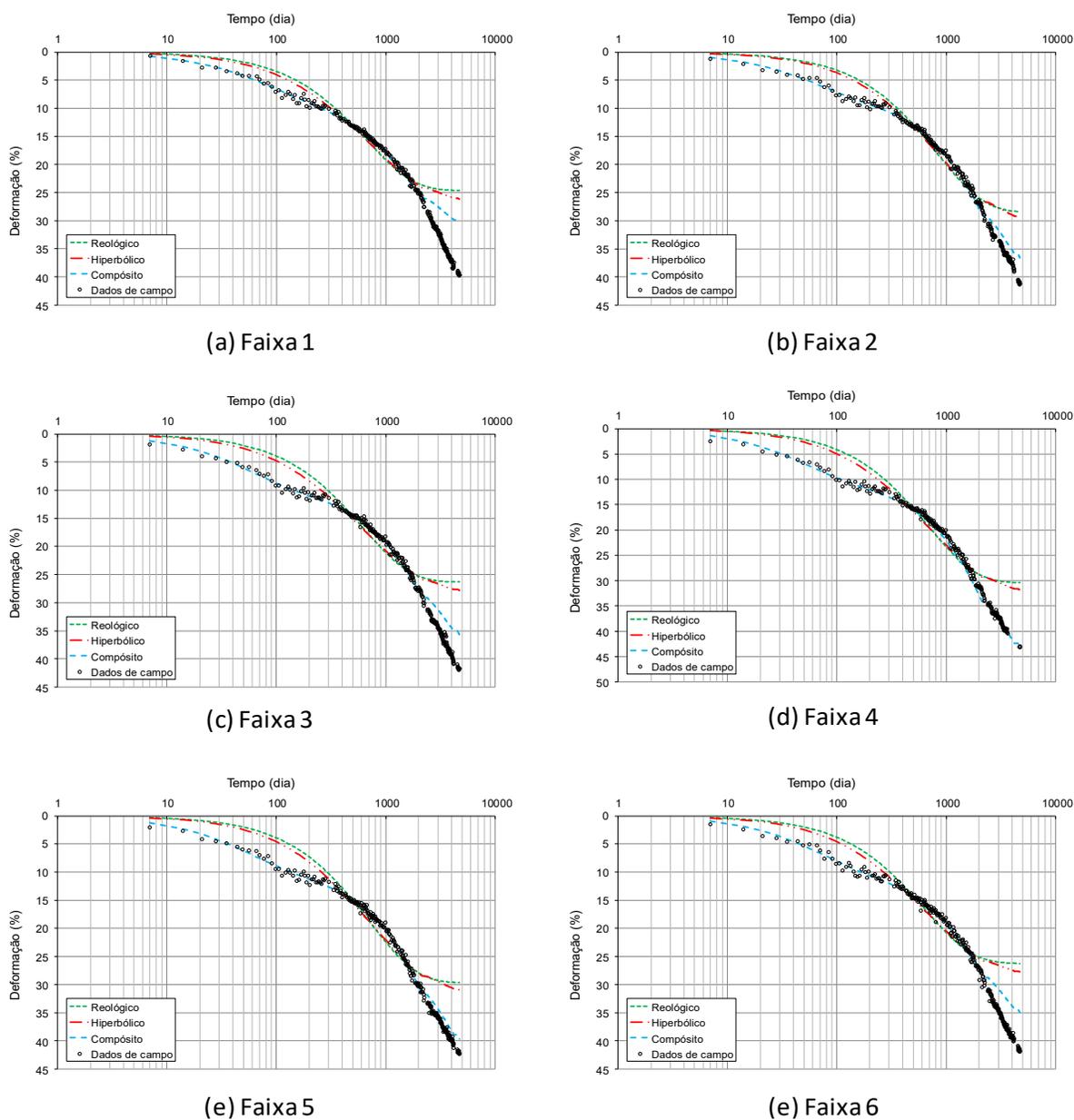


Figura 5. Deformações simuladas, utilizando registros de 6 anos na calibração, e medidas em campo.

Uma nova calibração dos modelos foi realizada com registros de 13 anos de monitoramento. A tabela 3 apresenta os parâmetros obtidos para a nova calibração. São também apresentados os parâmetros obtidos com a calibração dos recalques médios de todas as faixas, o que retrata uma condição mais próxima da operação de um aterro em escala real, incorporando a variabilidade intrínseca dos resíduos.

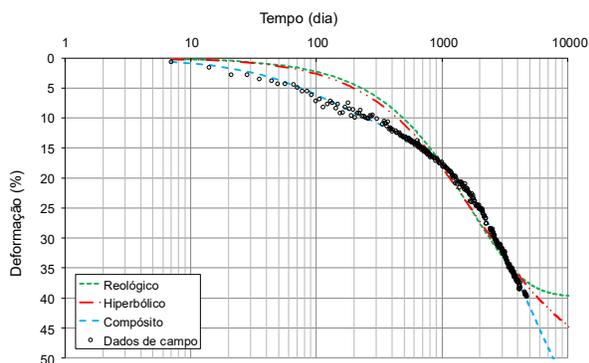
Tabela 3. Parâmetros obtidos na calibração utilizando registros de 13 anos.

Faixa	Modelo Reológico			Modelo Hiperbólico			Modelo Compósito				
	Desvio	λ/b (dia ⁻¹)	b (kPa ⁻¹)	Desvio	ρ_0 (m.dia ⁻¹)	S_{ult} (m)	Desvio	b (kPa ⁻¹)	c (dia ⁻¹)	Edg	d (dia ⁻¹)
1	1.66	0.00059	0.02070	1.17	0.00090	1.69677	0.07	0.0287	0.0002	0.0832	0.0096
2	1.35	0.00063	0.02400	0.92	0.00096	1.72454	0.12	0.0258	0.0003	0.0728	0.0099
3	2.28	0.00066	0.02000	1.64	0.00106	1.71323	0.09	0.0257	0.0002	0.0908	0.0165
4	2.13	0.00074	0.02070	1.48	0.00125	1.76397	0.10	0.0211	0.0004	0.0846	0.0278
5	1.83	0.00074	0.02000	1.25	0.00119	1.69958	0.10	0.0206	0.0004	0.0803	0.0236
6	2.06	0.00064	0.02030	1.48	0.00102	1.74975	0.10	0.0252	0.0002	0.0839	0.0150
Média	1.79	0.00068	0.02060	1.24	0.00108	1.70027	0.24	0.0213	0.0003	0.0814	0.0077

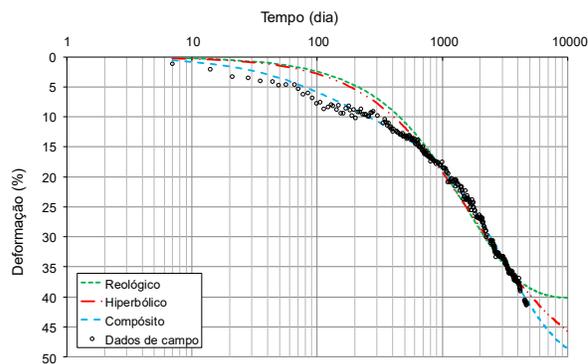
Em seguida foram feitas previsões das deformações de longo prazo para um período de 20 anos, para cada uma das faixas do aterro sanitário experimental, conforme mostrado na Figura 6. Observa-se novamente e de forma clara a limitação dos modelos reológico e hiperbólico, que subestimam os recalques de longo prazo, mesmo quando se utilizam extensos períodos de registros de campo na sua calibração. Embora de forma qualitativa, o modelo compósito, novamente, mostra resultados e tendências de longo prazo mais coerentes aos observados em campo.

Os resultados confirmaram que quanto maior o período usado na calibração, maiores e mais próximos aos registros de campo são as previsões de longo prazo dos modelos. O uso de parâmetros obtidos com a calibração de curtos períodos subestimou os recalques a longo prazo, mesmo com pequenos desvios obtidos na calibração.

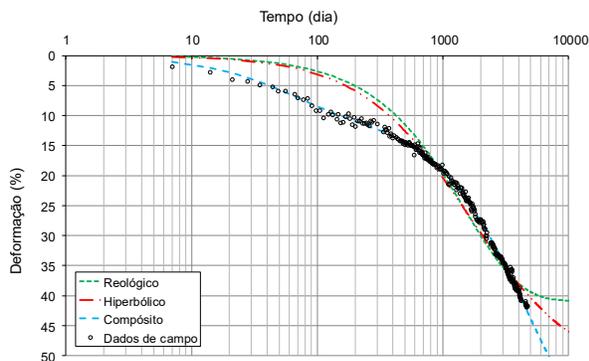
Os resultados do modelo compósito mostraram uma tendência à estabilização em tempos maiores e com maiores recalques finais, quando comparados aos outros modelos estudados. Considerando a presença de resíduos orgânicos lentamente degradáveis, espera-se que a completa estabilização do aterro ocorra apenas a longo prazo. A continuidade do monitoramento dos recalques no aterro sanitário experimental permitirá inferir se as mesmas observações já colocadas se confirmarão, quais sejam que os modelos empíricos dependentes do tempo subestimam os recalques de longo prazo, independente do período de registros utilizado na calibração, o que configura uma limitação importante de tal abordagem.



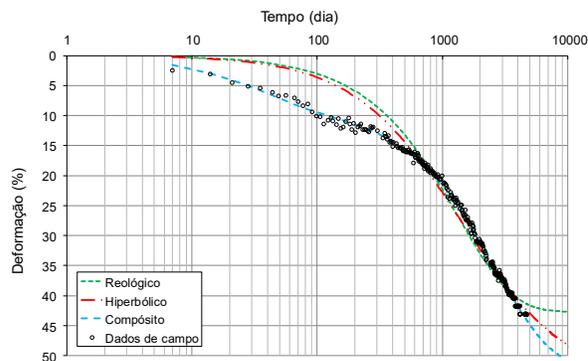
(a) Faixa 1



(b) Faixa 2



(c) Faixa 3



(d) Faixa 4

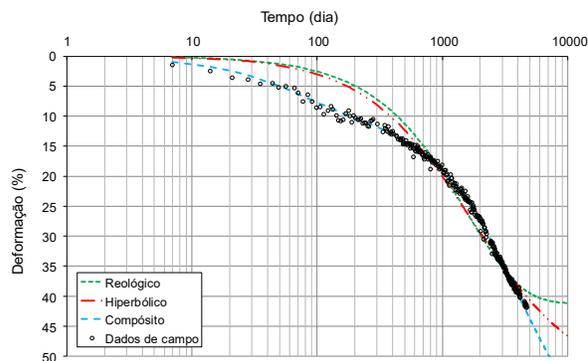
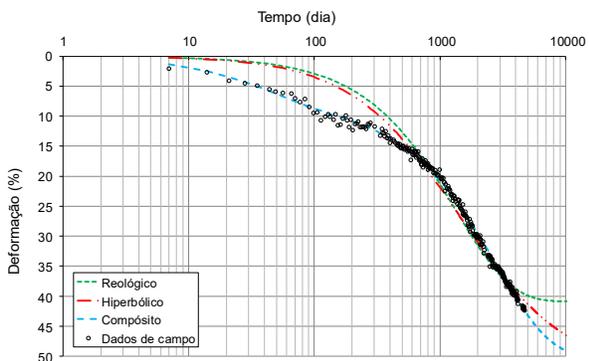


Figura 6. Deformações simuladas ao longo de 20 anos com base na calibração dos modelos para registros de campo de 13 anos.

Conclusão

O trabalho apresentou uma comparação dos registros de monitoramento de recalques de longo prazo em um aterro sanitário experimental com a previsão utilizando três modelos (reológico, hiperbólico e compósito).

Os resultados confirmaram que a previsão de recalques em aterros sanitários é complexa, o que pode ser atribuído à heterogeneidade dos resíduos e os complexos mecanismos envolvidos no processo.

Os resultados confirmaram que, quanto mais longos os períodos de registros de recalques usados na calibração dos modelos, maiores e mais próximas aos registros de campo são as previsões de recalques de longo prazo. Ressalta-se que mesmo com as limitações apresentadas, a utilização desses modelos deve ser avaliada, devido principalmente à sua simplicidade.

Os melhores ajustes foram obtidos com o modelo compósito, retratando a capacidade deste modelo de incorporar, mesmo que de forma empírica, o fato de que alguns materiais orgânicos se degradam mais lentamente e, que o efeito dessa degradação, em termos de recalques poderá ser sentido somente em longo prazo. Os resultados para a previsão de recalques de longo prazo obtidos pelos modelos hiperbólico e reológico subestimam significativamente os recalques e o tempo de estabilização dos mesmos, independentemente do período de registros utilizado na calibração.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à CAPES (Coordenação para o Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo contínuo apoio financeiro; à SLU-PBH (Superintendência de Limpeza Urbana da Prefeitura de Belo Horizonte) por toda o apoio a este estudo.

Referências bibliográficas

- Boscov, M. E. G. (2008) *Geotecnia Ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos. v.1. 248 pp.
- Catapreta, C. A. A. (2008) *Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto e construção*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. 314 pp.
- Coelho, H. M. G. (2005) *Avaliação da influência de camadas de cobertura intermediárias e finais na degradação de resíduos sólidos urbanos e na geração de lixiviados*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. 152 pp.

- Edgers, L., Noble, J. J., E Williams. (1992) A biologic model for long term settlement in landfills. In: *Mediterranean Conference on Environmental Geotechnolgy*. The Netherlands. Proceedings. Rotherdan, The Netherlands: Balkema, 177–184.
- Edil, T. B., Ranguete, V. J., Wuellner, W. W. (1992) Settlement of Municipal Refuse. *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, Arvid Landva e G. David Knowles (eds.). 225-239.
- Gibson, R. E., Lo, K. Y. (1961) A Theory of Soils Exhibiting Secondary Compression. *Acta Polytechnica Scandinavica C-10*, 1–15.
- Korf, E. P., Comparim, I., Santos, V. C., Prietto, P. D. M. (2016) Monitoramento e Modelagem dos Recalques de Resíduos Sólidos de Diferentes Composições em um Lisímetro de Laboratório. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, **9**(2), 200-211.
- Ling, H.I., Leshchinsky, D., Mohri, Y., Kawabata, T. (1998) Estimation of municipal solid waste landfill settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**(1), 21-28.
doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:1\(21\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:1(21))
- Liu, C. N., Chen, R. H., Chen, K. S. (2006) Unsaturated Consolidation Theory for the Prediction of Long-Term Municipal Solid Waste Landfill Settlement. In: *Waste Management & Research*, **24**(1), 80-91.
- Marques, A. C. M. (2001) *Compactação e Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, v.1 e v.2.
- McDougall, J. (2011). Settlements: the long and the short of it. In: *Geotechnical Characterization, Field Measurement and Laboratory Testing of Muncial Solid Waste*, ASCE *Geotechnical Special Publication*, **209**, 76-111.
- Park, H., Lee, S. R., Do, N. Y. (2002) Evaluation of decomposition effect on long-term settlement prediction for fresh municipal solid waste landfills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **128**, 107-118.
doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:2\(107\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:2(107))
- Simões, G. F., Carvalho, S. N., Almeida, L.L. (2005) Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Avaliação de Recalques em Aterros de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos. In: *23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Campo Grande.
- Simões, G. F., Catapreta, C. A. A. (2013). Monitoring and modelling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil, *Waste Management*, **33**, 420-430.
- Sowers, G. F. (1973) Settlement of waste disposal fills. In: *8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Moscou, 207-210.
- Teixeira, M. C., Pinheiro, R. J. B. (2018) Avaliação e previsão de recalques nos aterros sanitários de Minas do Leão e São Leopoldo, Estado do Rio Grande do Sul, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **23**(2), 345-354.
<https://doi.org/10.1590/S1413-41522018148318>
- Van Elk, A. G. P., Corrêa, L. R., Ritter, E. (2019) Análise de recalques em longo prazo no vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu, Rio de Janeiro, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **24**(3), 547-557.
- Wall, D.K., Zeiss, C. (1995) Municipal Landfill Biodegradation and Settlement. *Journal of Environmental Engineering. Asce*, **121**(3). doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1995\)121:3\(214\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1995)121:3(214))
- Yen, B. C., Scanlon, B. S. (1975) – Sanitary landfill settlement rates. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **101**(GT5), 475-487.