

Avaliação e previsão de recalques nos aterros sanitários de Minas do Leão e São Leopoldo, Estado do Rio Grande do Sul

Assessment and prediction of settlements in Minas do Leão and São Leopoldo Landfills, Rio Grande do Sul State

Marília Coelho Teixeira^{1*}, Rinaldo José Barbosa Pinheiro²

RESUMO

Os aterros sanitários (ASs) são considerados uma das soluções mais utilizadas para a disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSUs) em países em desenvolvimento. Entretanto, um dos problemas são os valores elevados de deslocamentos verticais (recalques), pois os resíduos são muito compressíveis, sofrem degradação com o tempo e, conseqüentemente, podem ocasionar danos nos sistemas estruturais dos ASs. O objetivo do trabalho foi avaliar os recalques de dois ASs verificando a eficiência de alguns modelos de previsão de recalques. A avaliação foi realizada nos ASs de Minas do Leão e de São Leopoldo, comparando os recalques medidos com os previstos e ajustando os modelos utilizados com base nos dados históricos. A partir das análises realizadas, foi possível verificar que os quatro modelos analisados obtiveram boa aderência entre os valores medidos e previstos.

Palavras-chave: resíduos sólidos urbanos; aterros sanitários; modelos de previsão; recalques.

ABSTRACT

Landfills are considered one of the best solutions for the disposal of municipal solid waste (MSW) in developing countries. However, one problem is the high values of vertical displacements (settlements), because the residues are very compressible and undergo degradation with time and consequently may cause damage to structural systems landfill. The objective is to evaluate the settlements of two landfills checking the efficiency of some settlements prediction models. The evaluation was performed in Minas do Leão and São Leopoldo Landfills, comparing the measured settlements with the predicted and adjusting the models used based on historical data. From the analyzes, we found that the four analyzed models showed good adhesion between the measured and predicted values.

Keywords: municipal solid wastes; landfills; prediction models; settlements.

INTRODUÇÃO

Muitos estudiosos do tema concordam que os aterros sanitários (ASs) são considerados uma das técnicas de disposição de resíduos em solo mais utilizadas no mundo por serem tecnicamente confiáveis, economicamente viáveis e ambientalmente corretos. Porém, um dos grandes problemas dos ASs são os valores elevados de deslocamentos verticais (recalques), pois os resíduos são muito compressíveis, sofrem degradação com o tempo e, conseqüentemente, podem ocasionar danos estruturais nos ASs, como nos sistemas de cobertura e impermeabilização, drenagem superficial e de efluentes (SOWERS, 1973; EL-FADEL *et al.*, 1999; MARQUES, 2001).

A estimativa dos recalques e o seu acompanhamento em ASs são muito importantes, pois o conhecimento sobre os recalques permite,

por exemplo: a determinação da real capacidade de armazenamento do aterro; a determinação da vida útil do AS, fator para a gestão de resíduos sólidos; o desenvolvimento de estudos para o reaproveitamento do local após o fechamento do aterro; o monitoramento geotécnico pelo acompanhamento do recalque e de sua velocidade, o que possibilita avaliar a estabilidade geotécnica dos taludes; e o desempenho da cobertura final, pois esta pode ser prejudicada por trincas oriundas dos recalques diferenciais, o que conseqüentemente aumenta a infiltração da água da chuva, podendo comprometer a estabilidade do aterro (SOWERS, 1973; PARK; LEE; DO, 2002; BOSCOV, 2008).

Os modelos de previsão são uma das ferramentas utilizadas para a estimativa de recalques em longo prazo em ASs. A partir

¹Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Santa Maria (RS), Brasil.

²Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UFSM - Santa Maria (RS), Brasil.

*Autor correspondente: marilia.c.teixeira.2@gmail.com

Recebido: 09/04/15 - Aceito: 07/02/17 - Reg. ABES: 148318

desses modelos e dos dados históricos de recalques pode-se conhecer o comportamento da massa de resíduos e avaliar os processos mecânicos e de biodegradação. Muitos pesquisadores têm proposto modelos de previsão de recalques em ASSs considerando suas diferentes características. Segundo Liu, Chen e Chen (2006), os modelos podem ser agrupados em quatro categorias: modelos baseados na mecânica dos solos; modelos empíricos (matemáticos); modelos reológicos; e modelos que levam em conta a biodegradação. Modelos constitutivos são a tendência atual para avaliar a compressibilidade de resíduos sólidos (MACHADO; CARVALHO; VILAR, 2002; MARQUES; FILZ; VILAR, 2003; MCDUGALL, 2007; BABU *et al.*, 2010; SIMÕES *et al.*, 2015).

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os recalques dos ASSs da Central de Resíduos de Recreio (CRR), em Minas do Leão, e da Central de Resíduos de São Leopoldo (CRSL), ambos no Estado do Rio Grande do Sul, com medidas de deslocamento de marcos superficiais (cinco anos de monitoramento), verificando a eficiência de alguns modelos de previsão de recalques em ASSs de resíduos sólidos urbanos (RSUs).

MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES

Dentre os vários modelos de previsão de recalques existentes na literatura para a estimativa de recalques em ASSs de RSU, foram utilizados quatro para a composição deste trabalho: o reológico (GIBSON & LO, 1961), o de Bjangard e Edgers (1990), o de Meruelo (PALMA, 1995) e o hiperbólico (LING *et al.*, 1998).

Modelo Reológico de Gibson e Lo

Edil, Ranguete e Wuellner (1990) utilizaram o modelo reológico de Gibson e Lo (1961), muito empregado para avaliação da compressão secundária em solos turfosos e orgânicos, para avaliar a compressibilidade de resíduos sólidos. Segundo os autores, o comportamento de turfas se assemelha ao dos resíduos, uma vez que ambos apresentam grandes vazios que se comprimem rapidamente durante a compressão primária, e a maior parte da compressão se dá devido ao processo lento e contínuo de compressão secundária em que se inicia um processo de quebra da estrutura das partículas. Esse modelo reológico é composto de dois elementos: um elemento de Hooke (mola com constante a) em série com um elemento de Kelvin (um elemento de Hooke – mola de constante b), associado, em paralelo, a um elemento de Newton (amortecedor de viscosidade λ/b).

Segundo Simões e Catapreta (2010), o funcionamento do modelo se dá pelo acréscimo de tensão (peso do resíduo ou cargas aplicadas), momento em que a mola de constante a se comprime instantaneamente, de maneira análoga à compressão primária em solos. A compressão do elemento Kelvin é retardada pelo amortecedor,

de maneira similar à compressão secundária em solos (tensão efetiva constante). A carga é transferida progressivamente para o segundo elemento de Hooke — segunda mola de constante b . Após certo tempo, toda a tensão efetiva será suportada pelas duas molas (elementos de Hooke). Esse modelo físico pode ser representado pela expressão matemática da Equação 1.

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

Em que:

ΔH = recalque;

H = altura inicial do aterro;

a e b = parâmetros de compressibilidade primária e secundária do resíduo;

σ_v = tensão vertical atuante;

λ/b = taxa de compressão secundária;

t = tempo a partir da aplicação da carga.

Edil, Ranguete e Wuellner (1990), em análise de 4 ASSs, obtiveram valores para os parâmetros de compressibilidade entre $5,1 \times 10^{-7}$ e $3,9 \times 10^{-4}$ kPa⁻¹ (parâmetro a), $1,0 \times 10^{-4}$ e $5,9 \times 10^{-3}$ kPa⁻¹ (parâmetro b) e $9,2 \times 10^{-5}$ e $4,3 \times 10^{-3}$ dia⁻¹ (parâmetro λ/b).

O modelo reológico é simples e apresentou pequenos desvios entre os valores previstos e os medidos, quando aplicado por Edil, Ranguete e Wuellner (1990), El-Fadel *et al.* (1999) e Marques (2001).

Modelo de Bjangard e Edgers

O modelo de Bjangard e Edgers (1990) foi proposto a partir das informações e da análise de 24 casos históricos de monitoramento de ASS (PARK; LEE; DO, 2002), sendo gerado um procedimento empírico de previsão de recalques. O modelo é expresso pela formulação apresentada na Equação 2.

$$\Delta H = \frac{\frac{C_c \cdot \log(\sigma_0 + \sigma)}{\sigma_0} + C_{a1} \cdot \log t_2}{t_1} + C_{a2} \cdot \log t_3 \quad (2)$$

Em que:

ΔH = recalque;

H = altura inicial da camada sob análise;

σ_0 = tensão vertical efetiva inicial ao meio da camada sob análise;

$\Delta \sigma$ = incremento de tensão vertical ao meio da camada sob análise;

t_1 = tempo, em dias, para conclusão da compressão inicial;

t_2 = tempo, em dias, para conclusão da compressão intermediária;

t_3 = tempo, em dias, para o qual é feita a previsão do recalque;

C_c = coeficiente de compressão primária;

C_{a1} = coeficiente de compressão secundária intermediária;

C_{a2} = coeficiente de compressão secundária de longo prazo.

Na fase inicial, os recalques ocorrem de forma rápida pela compressão mecânica dos resíduos e redução dos vazios existentes. Na segunda fase, os recalques são dominados essencialmente por interações mecânicas (*creep* e ravinamento), correspondente à compressão secundária intermediária. Na última fase, os efeitos da biodegradação dos resíduos são somados aos mecanismos da fase anterior, resultando em taxas de recalque mais elevadas (compressão secundária em longo prazo). Coeficientes de compressão secundária intermediária (C_{ai}) entre 0,0030 e 0,0380 (média de 0,0019) e secundária (C_{a2}) entre 0,017 e 0,510 (média de 0,125) foram determinados com aplicação do modelo aos casos analisados por Bjargard e Edgers (1990).

Modelo de Meruelo

No início da década de 1990 os grupos de Geotecnia da Universidade de Cantabria (Espanha) e da Universidade de Valparaíso (Chile) apresentaram um modelo de previsão de recalques secundários considerando os processos de degradação que ocorrem nos resíduos sólidos (PEREIRA, 2000). Esse modelo foi denominado de Meruelo em função do nome do AS a partir do qual foi desenvolvido (PALMA, 1995). O modelo depende da perda de massa dos materiais degradáveis que ocorre sob condições anaeróbicas e cujo principal fator limitante no processo de biodegradação é a taxa de hidrólise. Essa hipótese é baseada no fato de que a hidrólise é o mecanismo mais frequentemente utilizado pelos microrganismos para transformar compostos orgânicos complexos em compostos mais simples, possibilitando, assim, a obtenção de condições favoráveis à completa decomposição do resíduo em estágios sucessivos, conforme estudos das fases dos processos de degradação apresentados por Barlaz e Han (1993) e Tchobanoglous, Thiesen e Vigil (1994). Admite-se que todo o material hidrolisado encontrará condições ambientais favoráveis (substrato e microrganismos) para ser completamente eliminado a uma determinada taxa que propuseram no modelo. Tal modelo (Equação 3) tem a finalidade de prever os recalques a partir da formulação que incorpora e relaciona os parâmetros fundamentais que determinam os processos de degradação, como o tempo, o teor de matéria orgânica nos resíduos, a umidade, o ritmo de desenvolvimento dos processos de degradação, entre outros.

$$S_s = \frac{a \cdot H \cdot COD}{K_h \cdot T_C} \cdot (1 - e^{-K_h \cdot T_C}) \cdot (e^{-K_h \cdot t} - e^{-K_h \cdot t_0}) \quad (3)$$

Em que:

S_s = recalques ocorridos entre t_0 e t ;

t_0 = idade do aterro no início do nivelamento;

t = idade do aterro no último nivelamento;

α = coeficiente de perda de massa;

H = altura do aterro;

COD = quantidade de matéria orgânica biodegradável presente nos resíduos por ano;

T_c = tempo de construção do aterro (dias);

k_h = coeficiente de hidrólise (dia^{-1}).

O modelo ainda prevê a disposição de novas camadas de resíduos, a chamada taxa de aplicação de resíduos, simulando a operação dos aterros. Obtida a perda de massa, calcula-se a redução volumétrica admitindo alguma variação da densidade dos resíduos, como o tempo. Na Equação 3, o valor de COD que corresponde ao conteúdo orgânico degradável, segundo Palma (1995), nos estudos de compressibilidade de resíduos sólidos, corresponde a 0,25. Esse valor proposto corresponde à metade da fração total orgânica dos RSUs aterrados na Espanha (50%). Pereira (2000), nos seus estudos de compressibilidade de resíduos sólidos na Espanha, adotou o valor de COD proposto por Palma (1995); no Brasil, Melo (2003), Alcántara (2007), Simões (2000), Simões e Catapreta (2010) adotaram esse mesmo valor para determinação desse parâmetro em outros ASs no Brasil.

Como o modelo fundamenta-se em parâmetros físicos, autores como Sánchez-Alciturri *et al.* (1995), Diaz *et al.* (1995) e Espinace, Palma e Sanchez-Alciturri (1999) o consideram mais realista que métodos empíricos. O coeficiente de perda de massa (α) obtido por Simões e Catapreta (2010) e Melo (2003) variou entre 0,14 e 0,51, e o coeficiente de hidrólise (k_h), entre $1,0 \times 10^{-3}$ e $4,0 \times 10^{-3} \text{ dia}^{-1}$. Os valores de α encontrados por esses autores são próximos aos obtidos por Palma (1995), que obteve valores variando entre 0,15 e 0,50; já os valores de k_h são menores. O modelo fundamenta-se nos processos de decomposição, mas, se fossem incorporados outros mecanismos, seria mais completo.

Modelo Hiperbólico

Ling *et al.* (1998), a partir das análises das limitações dos modelos baseados em funções logarítmicas e de potência, propuseram a utilização de uma função hiperbólica para estimativa de recalques em ASs, conforme apresentado pela Equação 4:

$$S = \frac{t}{\frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{S_{ult}}} \quad (4)$$

Em que:

t = diferença entre o instante considerado e o início das medidas ($t = t_1 - t_0$);

S = diferença entre o recalque no instante considerado e o recalque inicial ($S = S_1 - S_0$);

ρ_0 = taxa ou velocidade inicial de recalques;

S_{ult} = recalque final.

Os parâmetros ρ_0 e S_{ult} devem ser determinados pela transformação da Equação 5 a partir de relações t/S versus t e realizando uma análise de regressão linear:

$$\frac{t}{S} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{S_{ult}} \quad (5)$$

Logo, os inversos do intercepto e da inclinação fornecem os parâmetros ρ_0 e S_{ult} .

Ling *et al.* (1998) apresentaram comparações de simulações realizadas utilizando o modelo proposto (função hiperbólica) com os modelos que adotam funções logarítmicas e de potência. Os autores verificaram que, para os casos analisados, a função hiperbólica apresentou melhores resultados. Valores obtidos para taxa de velocidade inicial de recalques (ρ_0) situaram-se entre $6,8 \times 10^{-3}$ e $1,3 \times 10^{-2}$ %/dia e deformação última ($\varepsilon_{ult} = S_{ult}/H$) entre 3,4 e 4,2%.

MATERIAIS E MÉTODOS

As informações das áreas de estudo foram levantadas e analisadas a fim de identificar as fases de implantação e operação dos aterros, os equipamentos e os procedimentos operacionais utilizados, os sistemas de drenagem de gases, percolado e cobertura final implantados, entre outros aspectos, visando a verificar a implicação destes na compressibilidade do maciço sanitário, na previsão de recalques (métodos mais adequados) e na implantação do monitoramento.

Aterros sanitários de Minas do Leão e São Leopoldo

A Central de Resíduos de Recreio (CRR — Aterro Sanitário de Minas do Leão) está localizada no município de Minas do Leão, Rio Grande do Sul, no km 180 da BR-290, a 80 km de Porto Alegre. A CRR apresenta uma área total de 500 ha, dos quais 73 (Áreas 1 e 2) são utilizados para receber resíduos de 150 cidades, com uma média de 50.000 t/mês. Esse aterro está localizado em uma cava gerada pela mineração de carvão a céu aberto, com substrato constituído por rochas sedimentares e lençol freático profundo.

A Central de Resíduos de São Leopoldo (CRSL — Aterro Sanitário de São Leopoldo) constitui-se de um aterro remediado (antigo lixão) e dois aterros emergenciais (Fase I e Fase II), localizados na Estrada do Socorro, no município de São Leopoldo. A CRSL ocupa uma área total de 16 ha, sendo 8,1 ocupados pelo aterro emergencial Fase I, que constitui a área avaliada neste trabalho. O aterro encontra-se desativado, mas, quando em funcionamento, recebia uma média de 500 t/mês de resíduos dos municípios de São Leopoldo, Novo Hamburgo e Canoas.

Medidas de recalques

O monitoramento dos deslocamentos verticais e horizontais foi realizado por meio de marcos superficiais, os quais são de concreto, com um pino metálico para permitir as medidas, e foram instalados entre a superfície dos resíduos e a cobertura final. A distribuição dos marcos foi estabelecida para verificar uma relação entre os deslocamentos observados, a altura dos resíduos e a avaliação da estabilidade do

maciço. Os deslocamentos foram medidos utilizando equipamentos convencionais de topografia.

No AS de Minas do Leão (Área 1) foram analisados 5 marcos superficiais (MT7R, MT9R, MT15, MT16 e MT21) no período de 1.800 dias, com início no ano de 2007 e término no ano de 2012. No AS de São Leopoldo (Fase I) foram analisados também 5 marcos superficiais (MDM10, MDM14, MDM15, MDM16 e MDM17) no período entre 1.458 e 2.067 dias, com início no ano de 2006 e término no ano de 2011.

Modelos de calibração

Neste trabalho foram selecionados quatro modelos de previsão para avaliação que incluem funções matemáticas e empíricas, além de modelos biológicos.

Na calibração dos modelos reológico (GIBSON & LO, 1961) e Meruelo (PALMA, 1995), foi utilizado o método dos mínimos quadrados, que objetiva o ajuste de curvas entre o recalque estimado pelo modelo e o recalque medido. Para aplicação desse método foi utilizado o programa *Microsoft Excel*, que dispõe da ferramenta *Solver*, que estima automaticamente os parâmetros requeridos para cada modelo buscando a melhor aproximação entre as curvas teóricas e experimentais. No *Solver*, a célula de destino foi definida com o valor da soma dos mínimos quadrados, sendo considerada a mínima possível, e nas células variáveis foram definidos os parâmetros das equações dos modelos de previsão que se deseja encontrar.

Foi utilizada a proposta de Marques (2001), que compara o recalque medido com o previsto, verificando o desvio (D) obtido entre os valores calculados e observados, conforme Equação 6. Essa proposta tem como objetivo verificar a aderência dos modelos, comparando-os entre si. Para este trabalho foram calculados os desvios do recalque final.

$$D_{i,j} = \frac{(\Delta H_{calc.(i,j)} - \Delta H_{obs,j})}{H_{obs,j}} \chi 100 \quad (6)$$

Em que:

$D_{i,j}$ = desvio de recalques no tempo j, baseado nas leituras do período i, em %;

$\Delta H_{calc.(i,j)}$ = recalque calculado no tempo j, baseado nas leituras do período i;

$\Delta H_{obs,j}$ = recalque observado no tempo j.

Por fim, foi utilizado o gráfico de correlação entre os dados medidos e previstos, em termos de recalques ou de deformações, para demonstrar e verificar a aderência dos modelos de previsão de recalques analisados neste trabalho e compará-los entre si.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para realização das análises, algumas características e hipóteses de cálculo tiveram de ser inicialmente estabelecidas, incluindo:

- sequência construtiva: o histórico da construção do aterro da CRR da Área 1 não foi obtido de maneira satisfatória, ou seja, sabe-se que o início da disposição de resíduo começou no ano de 2001 e o monitoramento em 2007. Também se desconhece o início e o término de cada célula de resíduo. Isso também ocorre na célula do aterro da CRSL, ou seja, sabe-se que o início da disposição de resíduos sólidos foi no ano de 2002 e seu monitoramento no ano de 2006;
- altura da coluna de resíduos (H) foi obtida a partir da diferença entre as cotas do fundo do aterro e dos marcos superficiais;
- tensões verticais efetivas sob cada marco superficial e atuantes a meia altura do maciço de resíduos (H/2) foram avaliadas, de maneira simplificada, adotando como peso específico dos resíduos o valor de 10 kN/m³;
- o parâmetro tempo inicial aplicado nos modelos foi estabelecido como sendo o tempo do início das leituras após o fechamento das células.

No aterro da CRR, os recalques observados variaram de 2,30 a 3,95 m (Figura 1A), correspondendo a uma deformação entre 12,6 e 24,2% em relação à altura inicial dos resíduos (Tabela 1). As velocidades de deformação nos meses iniciais situaram-se entre 3,5 e 7,0 mm/dia, em que os valores mais elevados foram verificados nos marcos MT16 e MT21. No aterro da CRSL, os recalques medidos variaram entre 0,68 e 2,36 m (Figura 1B), correspondendo a uma deformação entre 11,0 e 16,6% em relação à altura inicial dos resíduos (Tabela 1). As velocidades de deformação nos meses iniciais situaram-se entre 0,4 e 3,2 mm/dia, sendo os valores mais elevados verificados nos marcos MDM15 e MDM16. A relação entre os deslocamentos horizontais e verticais situou-se entre 14 e 59%, sendo os valores mais elevados para a CRSL, que é um aterro emergencial, com operação menos controlada.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos pela aplicação do modelo reológico de Gibson e Lo (1961) e do modelo de Bjargard

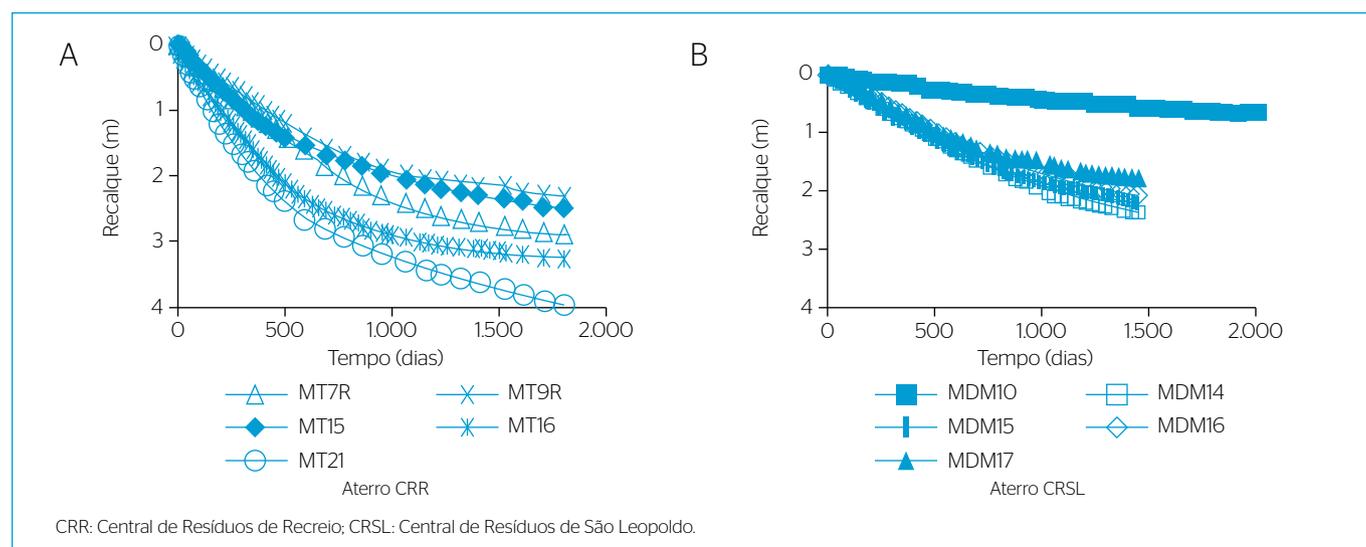


Figura 1 - Curva dos recalques para os marcos superficiais da Central de Resíduos de Recreio e da Central de Resíduos de São Leopoldo.

Tabela 1 - Recalques e deformações medidos nos marcos superficiais.

AS	Marco	H (m)	Recalque (m)	Deformações verticais (%)	Deslocamentos horizontais (m)	Recalque/deformações horizontais (%)
CRR	MT7R	20,00	2,90	14,50	0,41	14,14
	MT9R	14,00	2,30	16,43	0,33	14,35
	MT15	20,00	2,52	12,60	0,48	19,05
	MT16	13,50	3,27	24,22	1,80	55,05
	MT21	24,00	3,95	16,46	1,10	27,85
CRSL	MDM10	6,100	0,68	11,08	0,40	58,82
	MDM14	14,20	2,36	16,61	0,96	40,68
	MDM15	16,20	2,20	13,57	0,89	40,45
	MDM16	16,90	2,07	12,22	0,90	43,48
	MDM17	15,00	1,80	12,03	0,72	40,00

AS: aterro sanitário; CRR: Central de Resíduos de Recreio; CRSL: Central de Resíduos de São Leopoldo; H: altura.

e Edgers (1990). Verifica-se que, utilizando o modelo reológico, as médias de desvios dos recalques finais foram de 3,15% para o aterro da CRR e de 2,60% para o aterro da CRSL. Os parâmetros do modelo (a , b e λ/b), quando comparados com a faixa de valores apresentada por Edil, Ranguete e Wuellner (1990), situam-se no limite inferior; valores similares aos encontrados em ASs brasileiros (MARQUES, 2001; MELO, 2003). Ao aplicar-se o modelo Bjangard e Edgers (1990), os resultados obtidos dos desvios médios de recalques finais foram de 1,63% para o aterro da CRR e de 1,40% para o aterro da CRSL, considerados relativamente pequenos. Os desvios negativos significam que os recalques medidos foram maiores que os recalques calculados. Os parâmetros de compressão ($C_{\alpha 1}$, $C_{\alpha 2}$) desse método estão na faixa de valores obtida por Bjangard e Edgers (1990). O valor médio de $C_{\alpha 1}$ é inferior a 20% do valor de $C_{\alpha 2}$, mostrando a grande magnitude da compressão secundária de longo prazo associada à degradação nos valores dos recalques.

Os resultados da aplicação dos modelos de Meruelo e hiperbólico estão apresentados na Tabela 3. O modelo de Meruelo estima os recalques com base na degradação da matéria orgânica por meio dos parâmetros perda de massa e coeficiente de hidrólise. Conforme Melo (2003), esses parâmetros variam de acordo com o local de disposição do resíduo e são dependentes da idade da massa do resíduo aterrado e do grau de decomposição da matéria orgânica. O valor médio da perda de massa (α média = 0,269) está na faixa de valores encontrados por Palma (1995); para o aterro da CRR, os valores estão próximos do limite inferior, e para o aterro da CRSL, no centro da faixa. Já para o

coeficiente de hidrólise (k_h médio = $1,2 \times 10^{-3}$ dia⁻¹), os valores obtidos foram inferiores aos de Palma (1995), porém semelhantes aos dados de Melo (2003) e Simões e Catapreta (2010). Verifica-se também a boa concordância entre os recalques previstos e medidos (desvios de recalques baixos), com valores de desvio, em média, de 2,55% para o aterro da CRR e de 1,18% para o aterro da CRSL.

A partir dos resultados do modelo hiperbólico obteve-se uma média de desvios de recalques finais de 4,07% para o aterro da CRR e de 2,08% para o aterro da CRSL, ou seja, as deformações medidas foram menores que as estimadas. As taxas de recalque inicial (ρ_0) e deformação última (ϵ_{ul}) foram superiores às encontradas por Ling *et al.* (1998). Marques, Filz e Vilar (2003) e Simões e Catapreta (2010) obtiveram valores bem superiores, principalmente em relação à deformação última (entre 18 e 22%). Neste estudo, valores médios obtidos situaram-se em torno de 30% de deformação última.

Na Figura 2 são apresentadas as curvas de deformações medidas e previstas pelos modelos de previsão de recalques para os marcos de maior deformação dos dois ASs. Pode-se observar que os quatro modelos de previsão obtiveram uma boa aderência (baixos desvios e a curva do modelo se ajusta aos pontos medidos) entre as deformações observada e calculada. Como os desvios foram pequenos, os quatro modelos são adequados para estimar os recalques dos dois ASs. Nas Figuras 3 e 4 é mostrada a correlação entre os valores medidos e previstos com os mesmos valores de recalques, porém de outra forma, com a demonstração dos resultados obtidos dos quatro modelos de previsão analisados; ou seja, para se ter uma boa correlação, os valores

Tabela 2 - Resultados obtidos dos modelos de Gibson e Lo (1961) e Bjangard e Edgers (1990).

AS	Marco	Modelo Gibson e Lo				Modelo Bjangard e Edgers			
		a (kPa-1)	b (kPa-1)	λ/b (dia-1)	Desvio (%)	$C_{\alpha 1}$	$C_{\alpha 2}$	tk (dias)	Desvio (%)
CRR	MT7R	1,36E-06	3,89E-04	8,90E-04	5,05	0,0087	0,0577	242	-1,01
	MT9R	0,00	3,83E-04	1,17E-03	2,24	0,0110	0,0643	186	3,63
	MT15	8,01E-07	2,63E-04	1,52E-03	-1,08	0,0104	0,0403	138	-0,88
	MT16	1,23E-06	5,31E-04	1,64E-03	4,07	0,0202	0,0796	144	2,54
	MT21	0,00	3,31E-04	1,81E-03	-3,31	0,0151	0,0516	127	-0,09
	Média	6,78E-07	3,78E-04	1,41E-03	3,15	0,0131	0,0587	167	1,63
CRSL	MDM10	8,06E-07	3,14E-04	6,06E-04	1,41	0,0133	0,0482	404	0,08
	MDM14	6,53E-07	6,09E-04	5,59E-04	2,48	0,0090	0,0791	230	-3,60
	MDM15	2,97E-06	3,87E-04	8,65E-04	2,97	0,0087	0,0566	205	0,96
	MDM16	1,69E-06	3,89E-04	7,01E-04	2,53	0,0081	0,0540	230	0,55
	MDM17	8,62E-07	3,39E-04	9,12E-04	3,62	0,0096	0,0508	266	1,82
	Média	1,40E-06	4,08E-04	7,29E-04	2,60	0,0097	0,0577	267	1,40
Média geral	1,04E-06	3,93E-04	1,07E-3	2,88	0,0114	0,0582	217	1,51	

AS: aterro sanitário; CRR: Central de Resíduos de Recreio; CRSL: Central de Resíduos de São Leopoldo; a: coeficiente de compressibilidade primária; b: parâmetro de compressibilidade secundária; λ/b : taxa de compressão secundária; C_1 : coeficiente de compressão secundária intermediária; C_2 : coeficiente de compressão secundária de longo prazo; t_t : tempo de transição entre as fases de compressão secundária.

de deformação medida e estimada devem estar o mais próximo possível da linha de 45° (linha tracejada) das figuras apresentadas. Os modelos de Gibson e Lo (1961) e Ling *et al.* (1998) apresentam uma tendência de que, para tempos mais elevados, os valores previstos se afastem dos valores medidos.

CONCLUSÕES

O estudo dos recalques ou deformações verticais em ASs contribui para o melhor conhecimento sobre o comportamento do maciço de

resíduos, permitindo uma avaliação crítica de modelos de previsão, por intermédio da calibração com dados de campo e previsão de recalques em longo prazo. As deformações medidas para os dois aterros situaram-se entre 11 e 24% da altura inicial dos resíduos, com tendência a estabilização.

Os quatro modelos empregados tiveram resultados satisfatórios para a previsão de recalques, ou seja, obtiveram desvios de recalques finais (relação entre os valores medidos e previstos) entre -3,6 e 7,8% para o período de monitoramento de, aproximadamente, 5 anos.

Tabela 3 - Resultados obtidos dos modelos de Meruelo (PALMA, 1995) e hiperbólico de Ling *et al.* (1998).

AS	Marco	Modelo Meruelo			Modelo hiperbólico		
		α	K_n (dias ⁻¹)	Desvio (%)	e_{ult} (%)	ρ_0 (%/dia)	Desvio (%)
CRR	MT7R	0,262	1,0E-03	3,47	2,78E-01	1,87E-02	4,56
	MT9R	0,184	1,2E-02	2,25	2,99E-01	2,27E-02	4,85
	MT15	0,089	1,6E-03	-2,83	1,92E-01	2,12E-02	1,47
	MT16	0,129	1,8E-03	0,87	3,85E-01	4,57E-02	7,75
	MT21	0,086	1,8E-03	-3,34	2,42E-01	3,03E-02	1,71
	Média	0,150	1,5E-03	2,55	2,79E-01	2,77E-02	4,07
CRSL	MDM10	0,267	7,0E-04	0,02	2,50E-01	1,00E-02	1,96
	MDM14	0,762	6,0E-04	2,43	6,25E-01	1,65E-02	4,64
	MDM15	0,315	1,0E-03	1,45	2,70E-01	1,98E-02	1,83
	MDM16	0,359	8,0E-04	0,96	2,63E-01	1,59E-02	0,88
	MDM17	0,238	1,1E-03	1,05	2,13E-01	1,96E-02	1,08
	Média	0,388	8,0E-04	1,18	3,24E-01	1,64E-02	2,08
Média geral		0,269	1,2E-03	1,87	3,02E-01	2,20E-02	3,07

AS: aterro sanitário; CRR: Central de Resíduos de Recreio; CRSL: Central de Resíduos de São Leopoldo; α : coeficiente de perda de massa; k_n : coeficiente de hidrólise (dia⁻¹); e_{ult} : deformação última; ρ_0 : taxa ou velocidade inicial de recalques.

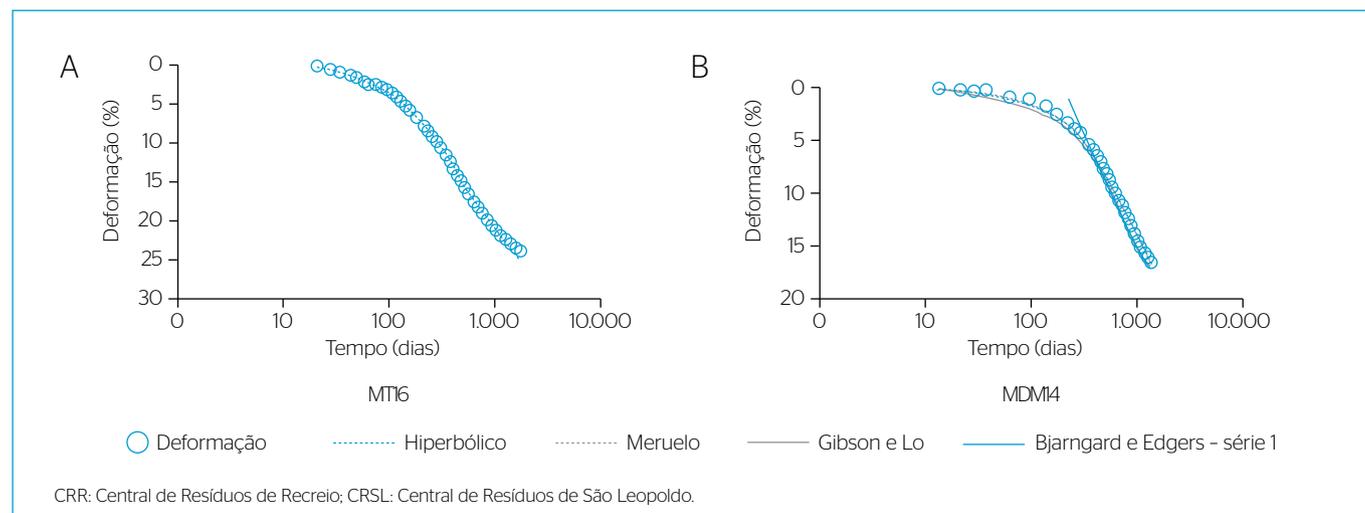


Figura 2 - Ajuste dos modelos de previsão aos recalques medidos nos marcos MT16 (Central de Resíduos de Recreio) e MDM14 (Central de Resíduos de São Leopoldo).

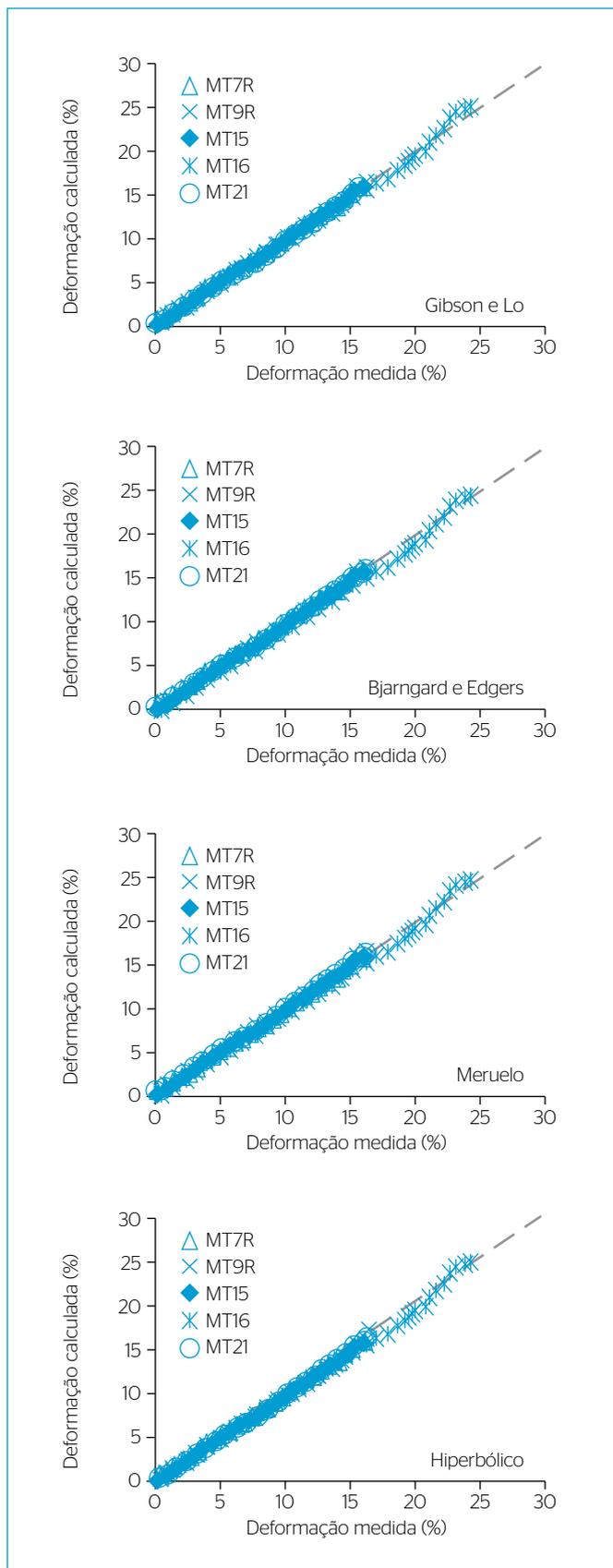


Figura 3 - Correlação entre as deformações medidas e previstas para os marcos superficiais dos aterros de Mina do Leão, com base nos modelos analisados.

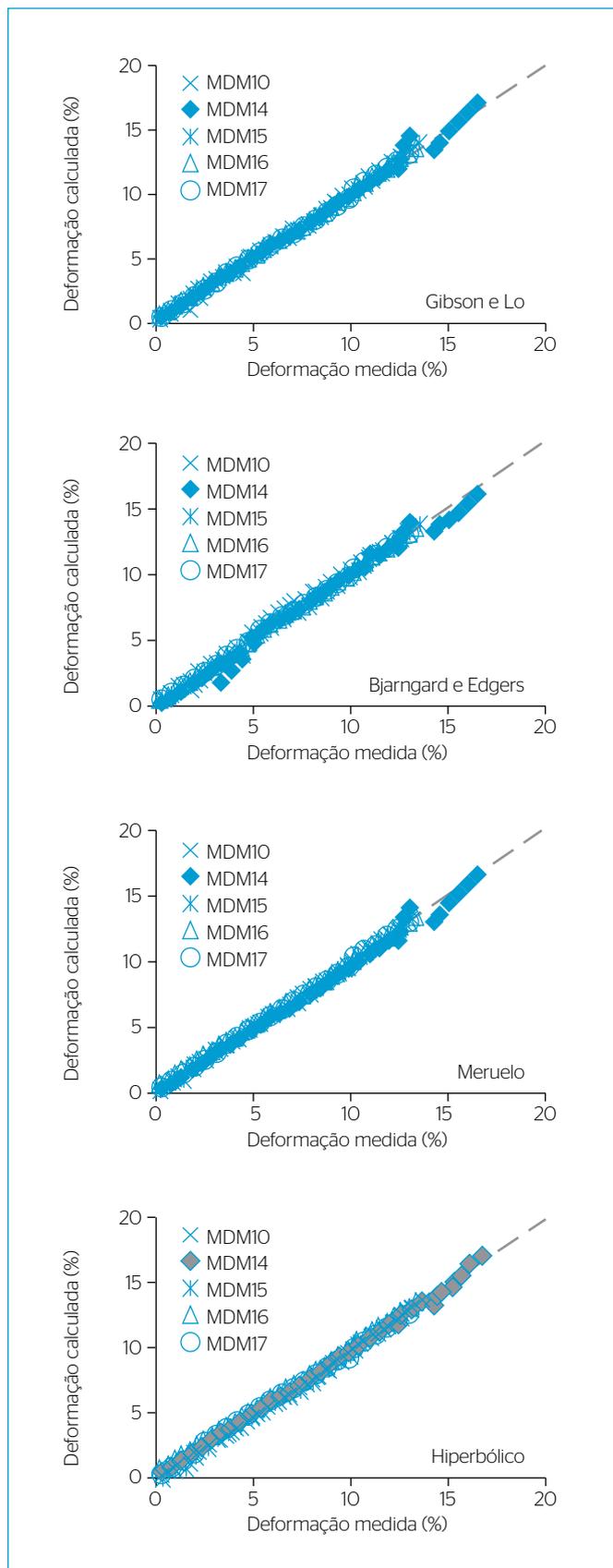


Figura 4 - Correlação entre as deformações medidas e previstas para os marcos superficiais do aterro de São Leopoldo, com base nos quatro modelos analisados.

Os menores desvios (média inferior a 2,0 %) foram os modelos de Bjangard e Edgers (1990) e de Meruelo (PALMA, 1995). Verificou-se também que os modelos de Gibson e Lo (1961) e Ling *et al.* (1998) apresentam uma tendência de que, para tempos mais elevados, os valores previstos se afastem dos valores medidos (desvios máximos entre 5,0 e 7,0%).

Os resultados demonstraram que, apesar de a previsão de recalques em ASs ser complexa (considerando heterogeneidade, biodegradação e outros mecanismos atuantes nos resíduos), os modelos de previsão de

recalques são uma boa ferramenta de avaliação tanto na fase de projeto como na fase de operação de ASs.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR), por fornecer os dados de monitoramento, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- ALCANTARA, P.B. (2007) *Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados*. 366 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- BABU, G.L.; REDDY, K.R.; CHOUSKEY, S.K.; KULKARNI, H. (2010) Prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement using constitutive model. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 14, n. 2, p. 139-150. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.1944-8376.00000024](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.1944-8376.00000024)
- BARLAZ, M.A.; HAN, R.K. (1993) Leachate and gas generation. In: DANIEL, D.E. (Org.). *Geotechnical Practice for Waste Disposal*. Londres: Chapman & Hall. p. 113-136.
- BJANGARD, A.B.; EDGERS, L. (1990) Settlements of municipal solid waste landfills. *Proceedings of the 13th Annual Madison Waste Conference*, Madison, v. 1, p. 195-205.
- BOSCOV, M.E.G. (2008) *Geotecnia Ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos. 248 p.
- DIAZ, J.G.L.; NAREA, M.S.; SANCHEZ-ALCITURRI, J.M.; IBARRA, A.A.; MONZON, L.T.; GONZALES, J.P.; LAMIA, M.F. (1995) Estimating material losses in sanitary landfills through biological degradation. In: INTERNATIONAL LANDFILL SYMPOSIUM, 5., Sardinia. *Proceedings...* Cagliari, p. 203-208.
- EDIL, T.B.; RANGUETE, V.J.; WUELLNER, W.W. (1990) Settlement of municipal refuse. In: LANDVA, A.; KNOWLES, G.D. (Orgs.). *Geotechnics of Waste Fills: Theory and Practice*. Pensilvânia: STP 1070. p. 225-239.
- EL-FADEL, M.; SHAZKAB, S.; SALIBY, E.; LECKIE, J. (1999) Comparative assessment of settlement models for municipal solid waste landfill applications. *Waste Management and Research*, v. 17, n. 5, p. 347-368. <https://doi.org/10.1177/0734242X9901700504>
- ESPINACE, R.; PALMA, G.; SANCHEZ-ALCITURRI, J.M. (1999) Experiencias de aplicación de modelos para la determinación de los asentamientos de rellenos sanitarios. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 11, Foz do Iguaçu, Brasil. *Anais...* Foz do Iguaçu, p. 473-479.
- GIBSON, R.E.; LO, K.Y. (1961) A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression. *Acta Polytechnica Scandinavica*, v. 10, n. 296, p. 1-16.
- LING, H.I.; LESHCHINSKY, D.; MOHRI, Y.; KAWABATA, T. (1998) Estimation of municipal solid waste landfill settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, n. 124, p. 21-28. [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. *Waste Management & Research*, v. 24, n. 1, p. 80-91. <https://doi.org/10.1177/0734242X06062579>
- MACHADO, S.L.; CARVALHO, M.F.; VILAR, O.M. (2002) Constitutive model for municipal waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 128, n. 11, p. 940-951. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:11\(940\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:11(940))
- MARQUES, A.C.M. (2001) *Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos*. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MARQUES, A.C.M.; FILZ, G.M.; VILAR, O.M. (2003) Composite compressibility model for municipal solid waste, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 129, n. 4, p. 372-379. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:4\(372\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:4(372))
- MCDUGALL, J. (2007) A hydro-bio-mechanical model for settlement and other behaviour in landfilled waste. *Computers and Geotechnics*, v. 34, p. 229-246. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2007.02.004>
- MELO, M.C. (2003) *Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca*. 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

PALMA, J.H. (1995) *Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos*. 294p. Tese (Doutorado) - Universidade de Cantabria, Santander, Espana.

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*, n. 128, p. 107-118. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:2\(107\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:2(107))

PEREIRA, A.G.H. (2000) *Compressibilidad de los residuos sólidos urbanos*. 281p. Tese (Doutorado) - Universidad de Oviedo, España.

SÁNCHEZ-ALCITURRI, J.M.; PALMA, J.H.; SAGASETA, C.; CAÑIZAL, J. (1995) Three years of deformation monitoring at Meruelo landfill. *Proceedings of Green 93: Waste Disposal by Landfill*, Balkema, p. 365-371.

SIMÕES, G.F. (2000) *Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos*. 139p. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SIMÕES, G.F.; CATAPRETA, C.A.A. (2010) Assessment of long-term settlement prediction models for municipal wastes disposed in an experimental landfill. *Soils and Rocks*, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 55-67.

SIMÕES, G.F.; MCDUGALL, J.; CATAPRETA, C.A.A. (2015) Modelling of an experimental landfill using HBM model - Part 2: settlement and biodegradation. *In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON HYDRO-PHYSICO-MECHANICS OF LANDFILLS*, 6., Delft, The Netherland. *Anais...* Delft, p. 54-57.

SOWERS, G.F. (1973) Settlement of waste disposal fills. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING*, 8., Moscou. *Anais...* Moscou.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S.A. (1994) Composicion y características, generacion, movimiento y control de los gases de vertedero. *In: TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S.A. Gestión Integral de Residuos Sólidos*. New York: McGraw-Hill. v.1. 1107p.