

REVISTA AIDIS

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

MONITORAMENTO E MODELAGEM DOS RECALQUES DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE DIFERENTES COMPOSIÇÕES EM UM LISÍMETRO DE LABORATÓRIO

*Eduardo Pavan Korf ¹
Isadora Comparin ²
Valter Caetano Dos Santos ²
Pedro Domingos Marques Prietto ³

SETTLEMENTS MONITORING AND MODELING OF
DIFFERENT COMPOSITIONS SOLID WASTE IN A
LABORATORY LYSIMETER

Recibido el 25 de junio de 2015; Aceptado el 1 de julio de 2016

Abstract

Solid waste of landfills have different sources and compositions. All these factors combined with environmental variables influence the waste mass compressibility, since the largest of settlements in landfills are from biologic degradation. The use of experimental cell small (lysimeters) can contribute to a better understanding theses behaviour. In this context, the work aimed the solid waste behavior modeling for two different compositions, in a laboratory scale lysimeter, for consequent settlements. Two samples were evaluated: composition 100% organic waste (L1) and typical composition of municipal solid waste (L2). The settlements were monitored over time in a laboratory lysimeter and the results were calibrated to four mathematical models of settlements prediction over time, allowing to obtain behavior parameters. During the monitoring of 100 days, the largest settlements were observed in L1 experiment (57%) compared to L2 experiment (24%). This behavior was also seen by α and a parameters indicating greater mass loss and settlements and also by $C_{\alpha'}$, $C_{\alpha_1'}$ e $C_{\alpha_2'}$ values indicating that the largest settlements occurs in the secondary compression stage which is characteristic of waste with a high compressibility, such as the predominantly organic composition evaluated in this study.

Keywords: Waste biodegradation, primary and secondary compression, settlements models.

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA) e Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim – RS, Brasil

² Universidade de Passo Fundo – RS, Brasil

³ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEng), Passo Fundo – RS, Brasil

*Autor corresponsal: Erechim – RS, Brasil, Rodovia ERS 135, km 72, Erechim/RS, CEP: 99700-970.
Email: eduardo.korf@uffs.edu.br

Resumo

Os resíduos sólidos depositados em aterros sanitários têm diversas origens e composições. Todos estes fatores aliados a variáveis ambientais influenciam a compressibilidade da massa de resíduos, já que a maior parcela dos recalques em aterros são resultantes da degradação biológica. O uso de células experimentais de pequenas dimensões (lisímetros) pode contribuir para uma melhor compreensão de tais fenômenos. Neste contexto, o trabalho objetivou a modelagem do comportamento de resíduos sólidos de duas diferentes composições, em um lisímetro de escala laboratorial, em relação aos conseguintes recalques. Duas amostras foram objeto de estudo: resíduos de composição 100 % orgânica (L1) e composição típica de resíduos sólidos urbanos (L2). Foram monitorados os recalques ao longo do tempo em um lisímetro de laboratório e os resultados foram calibrados à quatro modelos matemáticos de previsão de recalques ao longo do tempo, permitindo a obtenção de parâmetros de comportamento. Durante os 100 dias de monitoramento, os maiores recalques foram observados no experimento L1 (57 %), em comparação ao experimento L2 (24 %). Esse comportamento também foi visualizado pelos parâmetros α e a , indicando maior perda de massa e recalques e também pelos valores de $C\alpha'$, $C\alpha_1'$ e $C\alpha_2'$ que indicam que o recalque maior ocorre na fase de compressão secundária, a qual é característica de resíduos com alta compressibilidade, tais como os de composição predominantemente orgânica avaliados neste estudo.

Palavras-chave: biodegradação de resíduos, compressão primária e secundária, modelo de recalque.

Introdução

Conhecer a evolução dos recalques dos resíduos sólidos urbanos é essencial para o projeto de um bom sistema de aterramento, especialmente porque a massa de resíduos é constituída por materiais heterogêneos. Estes constituintes quando dispostos conjuntamente resultam em um material poroso, de propriedades geotécnicas, mecânicas e hidráulicas variáveis e seu comportamento é função de diversos fatores, tais como o material, a espessura, composição, peso específico de compactação, clima, método de preenchimento e de operação do aterro. A previsão do comportamento desses materiais pode, portanto, assegurar a integridade dos vários componentes geotécnicos que fazem parte do aterro e também facilitar a previsão do tempo de vida útil (Swati; Joseph, 2007; McDougall, 2008; Machado *et al.*, 2010; Babu *et al.*, 2011; Simões, 2012).

Como ferramenta de estudo do comportamento mecânico da massa de resíduos sólidos, modelos matemáticos vêm sendo utilizados para estimar os recalques da massa de resíduos em função do tempo. Vários modelos são descritos na literatura, fundamentados na teoria de recalques e modelos biológicos, que levam em consideração a degradabilidade dos resíduos (Sowers, 1973; Bjarngard; Edgers, 1990; Diaz *et al.*, 1995; Gandolla *et al.*, 1992; Simões, 2000; 2012; Alcantara, 2007; McDougall (2008). Por exemplo, Diaz *et al.* (1995), Gandolla *et al.* (1992) e McDougall (2008), diferentemente de outros autores que não atribuem aos recalques a taxa de degradação, propuseram modelos que consideram a biodegradação dos resíduos ao longo do tempo, os quais podem ser melhor empregados para o estudo de resíduos de composição orgânica predominante, como os resíduos sólidos urbanos. Nestes modelos, a taxa de recalque

é o conjunto da evolução dos recalques através da orientação das partículas presentes na massa de resíduos e da degradação da parcela orgânica.

Nesse contexto, este trabalho objetivou realizar o estudo da modelagem do comportamento de resíduos sólidos de duas diferentes composições, em um lisímetro de escala laboratorial, por meio de calibração de dados monitorados, em relação aos conseguintes recalques.

Metodologia

Lisímetro de laboratório

Para o estudo da biodegradação dos resíduos sólidos e os conseguintes recalques utilizou-se um lisímetro em escala de laboratório. Segundo Monteiro (2003), lisímetro é uma célula experimental preenchida com resíduos sólidos em escala reduzida, dotado de sistemas de drenagem de líquidos e gases, medição de nível dos líquidos, medidores de recalque, temperatura, concentração e fluxo de gases, propiciando o conhecimento de diversos parâmetros sob condições controladas. O lisímetro de laboratório utilizado na presente pesquisa foi construído e instrumentado por Santos (2010) no Laboratório de Geotecnia Ambiental do Centro Tecnológico (CETEC) da Universidade de Passo Fundo (UPF).

O lisímetro é constituído de um tubo de PVC de 35 cm de diâmetro interno, dividido em duas seções, uma de 80 cm e outra de 120 cm de altura. Estas partes do tubo de PVC foram conectadas por uma luva de PVC, formando um cilindro rígido com 240 cm de altura. Para a realização dos experimentos, os resíduos foram inseridos no lisímetro da base para o topo, sobre uma camada de drenagem e filtração. Este sistema de drenagem de fundo do lisímetro é composto por uma camada de 100 mm de argila expandida e por duas camadas de geotêxtil de 3 mm de espessura cada.

Experimentos

Foram realizados dois experimentos, o primeiro com amostras compostas por material 100 % orgânico (L1), composto por restos frutas, legumes e verduras de um supermercado e o segundo com composição gravimétrica brasileira segundo IBAM (2001), em 65% de matéria orgânica, 3% de vidro, 4% de metal, 3% de plásticos e 25% de papéis (L2). A composição de ambos os materiais L1 e L2 foi reproduzida em laboratório. Os resíduos foram compactados no interior do lisímetro em cinco camadas de aproximadamente 0.33 m cada, adotando-se peso específico de compactação de 4.5 kN/m³, correspondente ao grau de compactação gerado pelo tráfego de equipamentos, o que é mais comum em aterros brasileiros e correspondente à uma baixa energia de compactação, segundo Manassero *et al.* (1997).

Os ensaios foram realizados em períodos distintos com duração de 100 dias cada, inicialmente sendo avaliada a amostra de resíduos de composição orgânica (L1). Sobre os resíduos, com a função de simular a ação de uma sobrecarga, um disco de metal com uma massa de 10 kg foi utilizado para os dois experimentos. Buscando reproduzir a umidade resultante das chuvas e as perdas por evapotranspiração, os valores médios históricos da ocorrência de chuvas e evapotranspiração da cidade de Passo Fundo/RS ao longo dos últimos dez anos foram utilizados como parâmetro para a adição de umidade no meio. Dessa forma, toda a semana foram adicionados 4 litros de água nos experimentos L1 e L2.

A Tabela 1 apresenta um resumo das características geométricas e físicas das amostras de resíduos dos experimentos L1 e L2 após compactação.

Tabela 1. Características geométricas e físicas das amostras

Parâmetro	Valor
Altura inicial	1650 mm
Diâmetro	0.35 m
Volume inicial	0.158 m ³
Massa inicial	71.66 kg
Número de camadas	5
Espessura média das camadas	0.33 m
Massa média por camada	14.33 kg

Monitoramento dos Recalques

O monitoramento do lisímetro foi realizado através de instrumentação e sistema de aquisição de dados projetado por Santos (2010) e Bruxel (2009). Os dados do monitoramento dos recalques da massa de resíduos foram obtidos através de um encoder incremental, o qual transmite sinais devido às variações em movimento vertical de uma placa disposta sobre os resíduos. Esses sinais são captados por um sistema de aquisição de dados (SAD) que foi projetado através de parceria firmada com o Núcleo de Engenharia Elétrica da UPF. O SAD converte sinais analógicos em sinais digitais por meio de um conversor A/D modelo MCP3551 e imediatamente, envia à um microprocessador modelo PIC 16F877.

Calibração aos modelos de previsão de recalques

O Quadro 1 apresenta a relação de modelos utilizados para calibração da previsão de recalques.

Quadro 1. Modelos utilizados para calibração da previsão de recalques

Modelo	Equação/Descrição
Meruelo (Diaz <i>et. al.</i> , 1995)	$\Delta S = \frac{\alpha H COD}{K_h T_c} (1 - e^{K_h T_c}) (e^{-K_h t'} - e^{-K_h t_0})$ <p>Equação (1)</p> <p>Onde: α = coeficiente de perda de massa transformada em recalques; H = espessura da camada do aterro (mm); COD = conteúdo em fração de matéria orgânica biodegradável dos resíduos sólidos (0 – 1); T_c = tempo de construção do aterro ou de montagem do lisímetro (dia) – adotado 6 horas ou 0.25 d; K_h = coeficiente de hidrólise (dia⁻¹); ΔS = recalque ocorrido entre t₀ e t'; t₀ = idade do aterro no início do nivelamento (dia); t' = idade do aterro no último intervalo nivelado (dia).</p>
	$\Delta H = H a (e^{-K t_0} - e^{-k t})$ <p>Equação (2)</p> <p>Onde: ΔH = recalques medidos; H = espessura da camada; a = constante; k = constante. t = tempo de monitoramento dos recalques; t₀ = tempo inicial.</p>
Gandolla <i>et al.</i> (1992)	$\Delta H_1 = H_0 \cdot C'_c \cdot \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta \sigma'_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right)$ <p>Equação (3)</p>
	$\Delta H_2 = H_0 \cdot C'_\alpha \cdot \log \left(\frac{t_1 + \Delta t}{t_1} \right)$ <p>Equação (4)</p> <p>Onde: ΔH₁ = recalque inicial; C'_c = coeficiente de compressão primária (considerou-se intervalo para ocorrência de recalques primários de 8 dias); H₀ = espessura inicial da camada; σ'_{vo} = tensão vertical efetiva na altura média da camada; Δσ'_v = acréscimo de tensão vertical. Em que: ΔH₂ = recalque secundário; C'_α = coeficiente de compressão secundária; t₁ = tempo inicial da compressão secundária; Δt = acréscimo de tempo.</p>
Sowers <i>et al.</i> (1973)	$\frac{\Delta H}{H_0} = C'_c \log \left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \right) + C'_\alpha (1) \log \frac{t_2}{t_1} + C'_\alpha (2) \log \frac{t_3}{t_2}$ <p>Equação (5)</p> <p>Onde: ΔH = recalque da camada de espessura inicial H₀; P₀ = tensão efetiva vertical inicial; ΔP = acréscimo de tensão vertical efetiva; C'_c = coeficiente de compressão primária; C'_{α(1)} = coeficiente de compressão secundária intermediária; C'_{α(2)} = coeficiente de compressão secundária de longo prazo; t₁ = tempo para completar a compressão inicial; t₂ = tempo para completar a compressão secundária intermediária; t₃ = tempo para completar a compressão secundária de longo prazo.</p>
Bjarngard e Edger (1990)	

A equação 1 apresenta o modelo de Meruelo que é descrito por Diaz *et al.* (1995). Este modelo para a previsão biológica de recalques de Meruelo foi desenvolvido baseado na perda de massa da matéria orgânica degradável durante a fase anaeróbia, no qual é condicionada pela taxa de hidrólise (K_h), que está relacionada com a velocidade de degradação. Além disso, o modelo considera a compressibilidade dos resíduos dependente da disposição de novas camadas de resíduos sobre as existentes. O modelo considera que a degradação da massa de resíduos é contínua e que ocorrem acréscimos de massa durante certo tempo (T_c) e em um ritmo constante. A massa de resíduos degradada é expressa como uma fração do total de material contido no aterro, enquanto a relação entre volume de recalques produzidos e a correspondente massa perdida por degradação (α) é uma constante característica do tipo de aterro e dos resíduos depositados. (α) então expressa o coeficiente de perda de massa que se transforma em recalques.

O modelo de Gandolla *et al.* (1992), apresentado na equação 2, usa dados experimentais e se baseia numa função exponencial decrescente, representando a variação dos recalques em função do tempo, sem aplicação de sobrecargas que podem ser as camadas subjacentes dos resíduos e as camadas de cobertura final. Segundo Simões (2000), a principal característica do modelo reside na simplicidade dos parâmetros necessários: massa, umidade, classes de biodegradabilidade e porcentagem de matéria biodegradável, volume e densidade iniciais e finais. Neste modelo os recalques experimentais podem ser ajustados à equação, para determinação dos parâmetros “a” e “k”, os quais correspondem, respectivamente ao recalque unitário final (a) e ao ritmo da degradação (k), decrescente com o tempo.

O modelo desenvolvido por Sowers (1973), equações 3 e 4, avalia os recalques e o seu desenvolvimento com o tempo, considerando 3 fases. A compressão inicial ou imediata está associada à compressão dos vazios e dos constituintes por ação das cargas impostas e pelo processo de operação dos aterros. Já a compressão primária, representada pelo coeficiente de compressão inicial (C'_c) – equação 3, ocorre devido a drenagem dos líquidos existentes no interior do aterro, segundo a teoria clássica de Terzaghi. A compressão secundária, representada por C'_{α} , é, em parte, proveniente da degradação físico-química e biológica que ocorre no aterro. Os recalques nesta fase podem ser calculados pela equação 4 e seguem uma relação linear com o logaritmo do tempo, de modo similar ao fenômeno de compressão secundária observado em solos (Sowers, 1973).

O modelo de Bjarngard e Edgers (1990), descrito na equação 5, segue o mesmo princípio de Sowers (1973), mas sugere que a compressão secundária seja subdividida em duas fases distintas: uma intermediária e outra em longo prazo. A equação passa a ter como parâmetros os coeficientes de compressão primária (C'_c) e secundária ($C'_{\alpha(1)}$ e $C'_{\alpha(2)}$), o que elimina a necessidade de determinação do índice de vazios inicial.

Resultados

Nas Figuras 1 e 2, pode ser visto o gráfico de recalque em função do tempo para os dados experimentais (L1 e L2) e o ajuste realizado para os diferentes modelos. Na Tabela 2 estão apresentados os parâmetros obtidos para cada modelo utilizado na calibração.

Observando-se as Figuras 1 e 2, obtém-se um valor de recalque total de 57 % para os resíduos de composição 100 % orgânica (L1) e de 24 % para os resíduos sólidos urbanos (L2) em relação a altura inicial. Segundo Mcdougall *et al.* (2004) e Sri Shalini *et al.* (2010), a taxa de recalques num aterro sanitário depende principalmente da composição inicial dos resíduos, sendo maior a compressibilidade dos resíduos com o incremento da quantidade de materiais com propriedade de se decompor. Neste sentido, os altos valores observados de recalque ao longo dos 100 dias de monitoramento dos resíduos de composição puramente orgânica (L1) mostraram um comportamento que é proveniente da sua composição orgânica, mais favorável à degradação e mobilização de recalques. Já para o experimento L2, segundo Ling *et al.* (1998) e Carvalho (1999), os valores de recalques observados em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos se situam entre 10 % a 30 % da altura inicial do aterro e a maioria deles ocorrem nos primeiros anos após a disposição, diminuindo a velocidade de andamento nos anos subseqüentes.

Como pode ser observado na Figura 1, praticamente todos os modelos se ajustaram bem aos dados monitorados no experimento L1, principalmente o modelo de Bjarngard e Edgers (1990). Já para o experimento L2 (Figura 2), apenas dois modelos se ajustaram bem a curva dos dados de recalques monitorados, os modelos de Gandolla *et al.* (1992) e de Bjarngard e Edgers (1990). As curvas dos modelos de Meruelo de Diaz *et al.* (1995) e Sowers (1973) se distanciaram em alguns pontos dos dados observados em laboratório, tanto para o resíduo L1 quanto para L2.

Tabela 2. Parâmetros obtidos na calibração dos modelos aos recalques experimentais

Experimento	Tipo de resíduo/experimento	Meruelo		Gandolla		Sowers		Bjarngard e Edgers		
		α	K_h (d^{-1})	K	a	Cc'	$C\alpha'$	C_c'	$C\alpha_1'$	$C\alpha_2'$
L1	100 % orgânico	1.55	0.057	0.03	0.95	0.1	0.4	0.1	0.36	0.55
L2	Resíduos sólido urbano	0.8	0.1	0.12	0.26	0.4	0.1	0.4	0.1	0.08

Como pode ser observado nos gráficos (Figura 1 e Figura 2), a curva modelada ao Modelo de Meruelo se ajustou bem aos dados experimentais tanto para L1 quanto L2. Observando os resultados da tabela 2, percebe-se que α e K_h resultaram, respectivamente, em 1.55 e 0.057 d^{-1} para L1 e 0.8 e 0.1 d^{-1} para L2. Os maiores valores de α para L1 podem ser explicados devido à maior quantidade de matéria orgânica (100 %), com alta compressibilidade, resultando em maior recalque e consequente perda de massa. Em contrapartida para α , o valor do coeficiente

de hidrólise (K_h) encontrado para o resíduo L2 foi maior, o que possivelmente ocorreu devido à velocidade de degradação ter sido maior, estabilizando em 40 a 60 dias, ao contrário do resíduo L1, cuja a degradação foi mais lenta e praticamente nem estabilizou. No entanto, o que se percebeu foi que a maior taxa de degradação para L2, não necessariamente resultou em maior recalque, acarretando, por isso em menor valor de α .

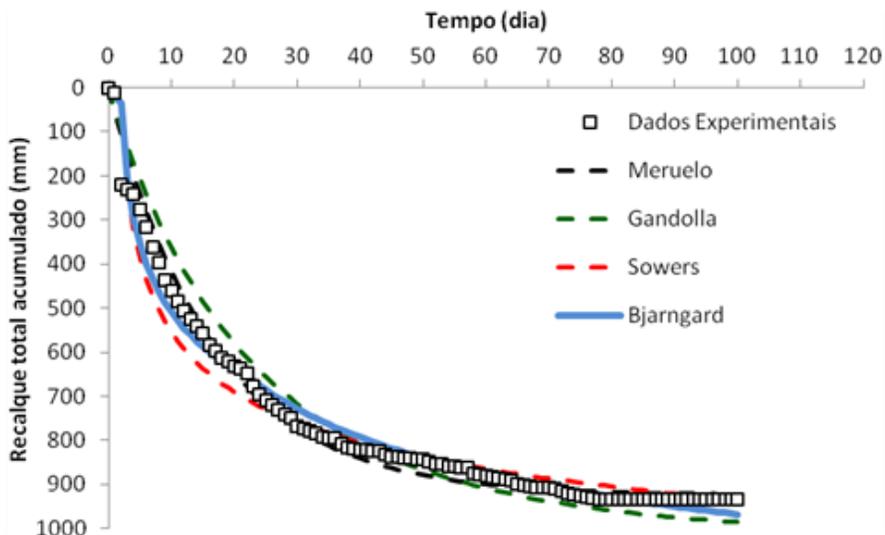


Figura 1. Calibração aos dados experimentais de recalques do experimento L1 aos modelos.

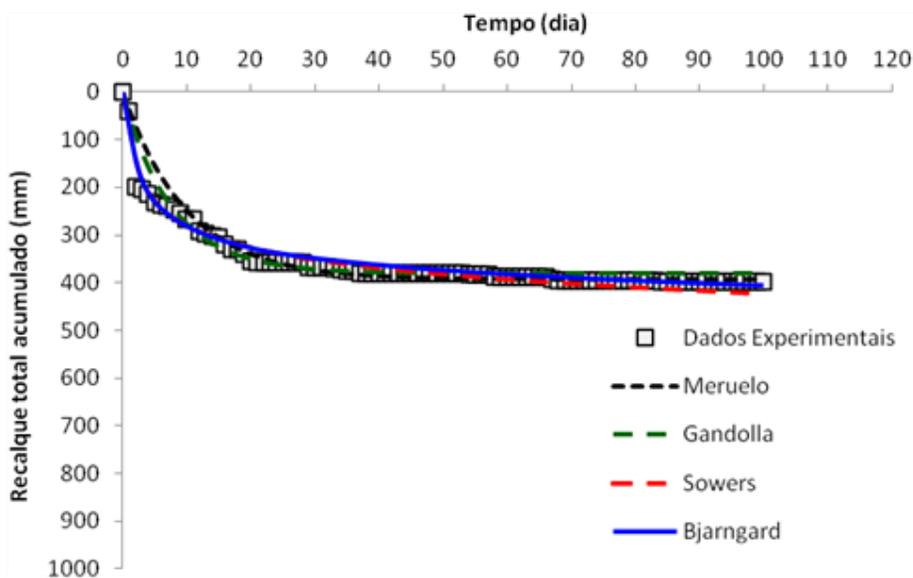


Figura 2. Calibração aos dados experimentais de recalques do experimento L2 aos modelos.

Os parâmetros coeficiente de perda de massa (α) e a constante de hidrólise (K_h) foram também investigados por Alcântara (2007). O autor observou recalques em dois lisímetros de campo com diferentes quantidades de matéria orgânica, 46 % e 60 %. No lisímetro com maior porcentagem de matéria orgânica (60 %), semelhante ao experimento L2 realizado nesta pesquisa, os valores de α e K_h ficaram na faixa de 0.17 a 0.31 e 0.0012 d⁻¹ a 0.0083 d⁻¹, respectivamente. Já para o lisímetro com menor quantidade de matéria orgânica (46 %), a faixa de α encontrada foi de 0.31 a 0.56 e para K_h foi de 0.0006 d⁻¹ a 0.001 d⁻¹. Pode-se verificar que estes valores são muito menores que os encontrados no experimento L2, com condições semelhantes desenvolvidas, possivelmente devido às disparidades entre condições de campo e laboratório.

Na aplicação do modelo de Gandolla *et al.* (1992), percebe-se que a curva modelada apresentou um comportamento muito semelhante aos recalques medidos experimentalmente para L2 (Figura 2) e, para L1 (Figura 1), a curva modelada se distanciou um pouco dos dados monitorados na compressão inicial. Percebe-se que os valores de “k” que melhor se ajustaram as curvas de recalque ao longo do tempo para L1 e L2, foram respectivamente, 0.03 e 0.12 (Tabela 2). Observa-se que o parâmetro “k” foi um pouco maior para L2, sendo isso explicado pela maior velocidade de degradação, como também mencionado no modelo de Meruelo. Dessa forma, valor de “k” de 0.12 para L2 indica que recalques significativos ocorreram em curtos intervalos de tempo, seguidos de estabilização, aumentando o ritmo de degradação, enquanto para L1 o “k” de 0.03 indica que os recalques ocorreram mais lentamente e uniformes ao longo do tempo, conferindo menores valores de L1 e indicando menor velocidade degradação. O parâmetro “a” ficou próximo ao obtido por Mariano *et al.* (1997) e por Alcântara (2007), que determinaram valores de “a” numa faixa de 0.32 a 1.0 e 0.68 a 0.95, respectivamente. O valor de “a” para o L1 de 0.95 demonstra que o recalque total final para este resíduo foi maior do que o recalque total final para L2, que obteve um “a” de 0.26. Conforme já observado anteriormente, este maior recalque pode ser explicado pela composição do resíduo L1, essencialmente orgânica e mais propícia a compressibilidade e consequentes recalques.

Pode-se observar através dos gráficos (Figuras 1 e 2), que a curva de ajuste ao modelo de Sowers para L1 se ajustou melhor aos dados experimentais do que para o resíduo L2. Observando os valores apresentados na tabela 2, percebe-se que o coeficiente de compressão primária (C_c') e o coeficiente de compressão secundária (C_{α}') encontrados para L1 e L2, respectivamente, foram de 0.1 e 0.4 e 0.4 e 0.1. Avaliando esses resultados, observa-se que os valores de C_c' estimados apresentaram uma diferença, caracterizando, para o resíduo orgânico um recalque primário menor em comparação com o resíduo sólido urbano. Isto pode ter ocorrido devido às características dos resíduos de composição urbana, esses apresentando partículas maiores o que pode resultar em um recalque inicial maior devido ao rearranjo das

partículas de resíduos. Já os valores do coeficiente de compressão secundária ($C_{\alpha'}$), encontrados para L1 de 0.4 e L2 de 0.1, mostram que maiores recalques secundários puderam ser observados em L1. Verificando as curvas geradas, em ambos os casos, pode-se observar um comportamento aproximadamente linear para o recalque secundário e por isso o ajuste da curva para L1 adaptou-se melhor aos dados experimentais, possivelmente devido às características de degradação mais favoráveis.

De acordo com experimentos realizados por Machado *et al.* (2010), valores de $C_{c'}$ e $C_{\alpha'}$, variaram de 0.167 a 0.361 e 0.011 a 0.018, respectivamente. Já para Carvalho (1999), valores de $C_{c'}$ ficaram entre 0.17 e 0.23 e de $C_{\alpha'}$ 0.013. Tapahuasco (2009) obteve em sua tese valores de $C_{c'}$ de 0.24 a 0.32 e $C_{\alpha'}$ de 0.032. Para Pelkey (1997), $C_{c'}$ encontrados ficaram entre 0.17 a 0.24 e valores de $C_{\alpha'}$ de 0.015 a 0.010. Observando-se a literatura, pode-se destacar que o valor de coeficiente de compressão primária ($C_{c'}$) encontrado para L1 (0.1), neste trabalho, ficou próximo dos valores encontrados por Machado *et al.* (2010), Carvalho (1999) e Pelkey (1997). Já o valor encontrado de $C_{c'}$ para L2 (0.4) neste trabalho ficou um pouco acima das faixas encontradas pelos autores. Quanto ao coeficiente de compressão secundária ($C_{\alpha'}$) encontrado em L1 e L2, pode-se dizer que ficaram acima das faixas encontradas pelos autores referenciados, o que é explicado, pela característica, em especial para L1, com maior teor de matéria orgânica, intensa degradação e compressibilidade, possibilitando maiores recalques relativos à etapa de compressão secundária.

Os resultados apresentados nos gráficos Figura 1 e Figura 2 e as medidas dos parâmetros indicados na Tabela 2 mostram que o modelo de Bjarngard e Edgers (1990) ajusta-se bem aos dados experimentais de L1 e L2. De acordo com a tabela 2, percebe-se que o ajuste para L1 que resultou no $C_{\alpha_1'}$ = 0.36, corresponde ao primeiro trecho da curva, resultante da compressão secundária devido ao fenômeno de deformação lenta. O segundo trecho, $C_{\alpha_2'}$ = 0.55, além de envolver os fenômenos de deformação lenta, também corresponde a decomposição físico-química e biológica do resíduo ao longo do tempo. Pode-se observar na Figura 1 que, os recalques previstos adaptados ao modelo, em geral, ajustaram-se bem aos pontos experimentais. Para o lisímetro L2, os valores de $C_{\alpha_1'}$ e $C_{\alpha_2'}$ resultantes foram de 0.1 e 0.08, respectivamente, menores que L1, o que é mais destacável para $C_{\alpha_2'}$ que equivale a compressão lenta resultante da degradação da fração orgânica, que foi mais intensa para L1, como já era esperado devido às características dos resíduos orgânicos serem muito mais propensas a maior degradabilidade.

Bjarngard e Edgers (1990), em seus estudos com a aplicação do modelo determinaram que o parâmetro $C_{\alpha_1'}$ variou entre 0.003 e 0.038 e o $C_{\alpha_2'}$ entre 0.017 e 0.51. Percebe-se que os valores determinados neste trabalho (0.36) estão muito acima dos valores de $C_{\alpha_1'}$ referenciados e levemente acima dos valores citados para $C_{\alpha_2'}$, fato que também se observou para os valores

de C_{α}' , no modelo de Sowers, sendo, esta variação explicada pela característica de intensa degradação e compressibilidade nos resíduos estudados nesta pesquisa (por ex. L1 com 100 % de Matéria Orgânica), possibilitando maiores recalques relativos à etapa de compressão secundária, acarretando em maiores valores dos coeficientes relacionados.

Conclusão

Os resultados indicaram que a composição dos resíduos influencia consideravelmente na magnitude dos recalques. Para resíduos com maior porcentagem de matéria orgânica (L1), pode-se observar recalques maiores (57 %) ao longo do tempo que para L2, devido a degradação da parcela orgânica dos resíduos. O recalque total observado para L2 equivaleu a 24 % da altura inicial da coluna de resíduos, estando este valor dentro da faixa encontrada em aterros sanitários.

Esse comportamento relacionado com a magnitude dos recalques é também visualizado para L1, pelos maiores valores dos parâmetros α e a , obtidos pelos modelos de Meruelo e Gandolla, respectivamente, os quais estão relacionados à perda de massa e recalques. Já, em se tratando da fase de degradação dos resíduos, pôde-se observar pelos valores de C_{α}' , C_{α_1}' e C_{α_2}' , para os modelos de Sowers e Bjarngard e Edgers, que estes também são maiores para L1, o que indica que o recalque maior ocorre na fase de compressão secundária, a qual é característica de resíduos com alta compressibilidade, tais como os de composição predominantemente orgânica avaliados neste estudo.

Referencias bibliográficas

- Alcântara, P.B. (2007) *Avaliação da influência da composição de resíduos urbanos no comportamento de aterros simulados*, Tese de doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 366 pp.
- Babu, G.L., Reddy, K.R., Chouksey, S.K. (2011) Parametric study of MSW landfill settlement model, *Waste Management*, **31**, 1222-1231.
- Bjarngard, A., Edgers, L. (1990) Settlements of municipal solid waste landfills, *13th Annual Madison Waste Conference*, Madison, 192-205.
- Bruxel, P. (2009) *Sistema de aquisição de dados para resíduos sólidos urbanos*. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo-RS, 89 p.
- Carvalho, M.F. (1990) *Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos*. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Geotecnia), Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 330 pp.
- Diaz, J.G.L., Narea, M.S., Sanchez-Alciturri, J.M., Ibarra, A.A., Monzon, I.T., Gonzalez, J.P., Lamia, M.F. (1995) Estimating material losses in sanitary landfills through biological degradation. Proceedings, 5th International Landfill Symposium – Sardinia 95, Cagliari, Italy, 203-208.

- Gandolla, M., Dugnani L., Bressi, G., Acai, C. (1992) The determination of subsidence effects at municipal solid waste disposal sites. *6th International Solid Waste Congress and Exhibition, Madrid*, 1-17.
- IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal. (2001) *Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos. 5 ed. Rio de Janeiro: IBAM*, 200 pp.
- 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.
- Machado, S.L., Karimpour-Fard, M., Shariatmadari, N., Carvalho, M.F., Nascimento, J.C.F. (2010) Evaluation of the geotechnical properties of MSW in two Brazilian landfills, *Waste Management*, **30**, 2579-2591.
- Mariano, M.O.H., Maciel, F.J., Fucale, Jucá, J.F.T., Brito A.R. (2007) Estudo da composição dos RSU do projeto piloto para recuperação de biogás no aterro da Muribeca/PE. In: 6º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Recife.
- Manassero, M., Van Impe, W.F., Bouazza, A. (1997) Waste disposal and containment. In: Kamon, M. (ed). *Environmental geotechnics*. Holanda, Rotterdam: Balkema.
- McDougall, J.R., Pyrah, I.C., Yuen, S.T.S. (2004) Extended phase relations and load effects in MSW. *Waste Management Journal*, **24**, 251-257.
- McDougall, J.R. (2008) A hydro-bio-mechanical model for settlement and other behaviour in landfilled waste. School of Engineering & Built Environment Napier University. *1st Middle European Conference on Landfill Technology*.
- Monteiro, V.E.D. (2003) *Intenções físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do Aterro Sanitário de Muribeca Recife*. Tese (Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco. 521 pp.
- Pelkey, S.G. (1997). *Geotechnical properties of municipal solid waste*. Thesis (Masters of Science in Engineering), Department of civil Engineering, University of New Brunswick: 125 pp.
- Pessin, N., Silva, A.R., Conto, S.M., Panarotto, C.T., Beal, L.L. (2002) Concepção e implantação de células piloto de aterramento de resíduos. In: Junior, A. B. de C, Lange, L.C., Gomes, L.P., Pessin, N. *Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos em pequenas comunidades*. Rio de Janeiro, Rima Artes e Textos, 13-17.
- Santos, V.C. (2010) Projeto, Construção e instrumentação de um lisímetro em escala de laboratório para estudos em resíduos sólidos urbanos. Trabalho de Conclusão de curso (Graduado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo-RS. 105 pp.
- Simões, G.F. (2000) *Modelo para avaliação de recalques em aterros sanitários de disposição de resíduos sólidos urbanos*. Tese (Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil), Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 136 pp.
- Simões, F.S., Catapreta, C.A.A. (2012) Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil, *Waste Management*, **33**(2), 420-430.
- Sowers, G.F. (1973). Settlement of waste disposal fills. *8th Int. Conf. on Soil Mech. Found. Engrg.*, Moscow. Part 2, 207-210.
- Swati, M.; Joseph, K.(2008) Settlement analysis of fresh and partially stabilised municipal solid waste in simulated controlled dumps and bioreactor landfills, *Waste Management*, **28**, 1355-1363.
- Sri Shalini, S.; Karthikeyan, O.P.; Joseph, K. (2010) Biological stability of municipal solid waste from landfills under tropical environment. *Bioresource Technology*, **101**, 845-852.
- Tapahuasco, W.F.C. (2009) *Análise do comportamento de maciços sanitários e proposta de um novo modelo de previsão de recalques considerando a parcela de biodegradação*. Tese de Doutorado (Departamento de Engenharia Civil), Universidade de Brasília – DF. 161 pp.