

Efeito da temperatura na deformabilidade de resíduos sólidos urbanos com alto grau de degradação

Fernando H. M. Portelinha

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, fportelinha@ufscar.br

Natália de Souza Correia

Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, nataliacorreia@usp.br

Matheus Cardoso dos Santos

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, matheus.cardoso.santos@gmail.com

RESUMO: O aspecto negativo dos recalques progressivos de aterros sanitários consiste nos indesejáveis deslocamentos verticais diferenciais pós-operacionais, que resultam no desenvolvimento de trincamentos superficiais e, possivelmente, na ruptura do sistema de cobertura e/ou do sistema de impermeabilização. Em condições de trabalho, o resíduo sólido urbano pode estar submetido à elevadas temperaturas, que afetam sua deformabilidade. A presente pesquisa visa a avaliação da deformabilidade de resíduos sólidos urbanos do aterro sanitário da cidade de São Carlos-SP, considerando o efeito da temperatura interna desenvolvida no interior do aterro. Para a avaliação de resíduos sólidos urbanos com alto grau de degradação, foram utilizadas amostras com 30 anos de aterramento. Os ensaios consistiram na imposição de cargas constantes nas amostras de resíduos com medidas de deslocamentos verticais ao longo do tempo, utilizando um edômetro de grande escala. Estes ensaios foram conduzidos com três temperaturas: ambiente (em torno de 25° C), 50° C e 70° C. Os resultados mostram que a deformabilidade do RSU aumentou na ordem de 2 vezes quando submetido a 50° C em relação à temperatura ambiente. Acima desta temperatura, a deformabilidade não foi afetada. Deformações verticais ao longo do tempo foram, na maior parte, provenientes do comportamento de fluência da parcela de material plástico.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos sólidos urbanos, Degradação, Deformabilidade, Temperatura.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os diversos aspectos que devem ser estudados na engenharia de aterros sanitários há a preocupação com os recalques de aterros de resíduos sólidos durante a fase de funcionamento e após o fechamento do sistema.

O aspecto negativo dos recalques progressivos de aterros sanitários consistem nos indesejáveis deslocamentos verticais diferenciais pós-operacionais, que resultam no desenvolvimento de trincamentos superficiais e, possivelmente, na ruptura do sistema de cobertura e/ou do sistema de impermeabilização (Ling et al., 1998). Já o aspecto positivo dos recalques destaca-se na oportunidade do

aumento da capacidade de armazenamento de resíduos no aterros, desde que sejam feitas previsões consistentes do recalque máximo para os diferentes níveis de carregamento (Chen et al., 2010). Para tanto, torna-se importante compreender os mecanismos que envolvem o processo de compressão de resíduos sólidos urbanos nas condições impostas, durante e após o período de serviço.

Basicamente, a compressão do resíduo depende do nível de carga, das propriedades mecânicas do resíduo, da infiltração de água ou do percolado, da temperatura interna, da fração orgânica e das características físico-químicas de outras frações do resíduo (Rao e Singh, 2004).

O recalque total dos resíduos sólidos urbanos

é compreendido em três fases: (1) compressão imediata ou primária, (2) fluência mecânica e (3) biocompressão ou compressão secundária (Sharma e De, 2007; Sivakumar Babu et al., 2010; Gourc et al., 2010; Bareither et al., 2012). Por se tratar de um processo de decomposição anaeróbia das frações biodegradáveis, esta parcela de recalque é dependente da fração orgânica, do teor de umidade e da temperatura (Rao e Singh, 2004).

Com os aspectos abordados, o presente trabalho visa avaliar, através de ensaios de laboratório, a compressibilidade de resíduos sólidos urbanos com alto grau de degradação (30 anos) e diferentes temperaturas, associando o processo de decomposição do resíduo sólido e da composição do líquido produzido aos parâmetros de compressibilidade do material. Avaliações foram conduzidas com percolação de chorume, de modo a simular os sistemas convencionais de aterro sanitário e os sistemas biorreatores. Para tanto, um equipamento foi desenvolvido de forma a impor as diferentes condições e variáveis citadas.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Resíduo Sólido Urbano

O resíduo sólido urbano (RSU) avaliado nesta pesquisa foi obtido no aterro controlado desativado da cidade de São Carlos (SP) com o uso de um poço circular de amostragem, com diâmetro de 1,5 m, realizada por Abreu (2015). Utilizou-se um resíduo com alta degradação (envelhecido), coletado a 16 m de profundidade, com idade de aterramento de 30 anos. A composição gravimétrica foi realizada 50 kg de resíduo, sendo cada porção calculada em relação ao peso seco dos seus componentes. Na Tabela 1 são comparadas as composições gravimétricas, determinadas em laboratório, de um resíduo jovem (antes do aterramento) e do resíduo envelhecido pós-aterramento (alto grau de degradação). A Figura 1 apresenta o resíduo jovem e o resíduo envelhecido.

Tabela 1. Composição gravimétrica dos resíduos

Componentes	Composição (%)	
	Jovem	Envelhecido
Orgânicos	58	8
Papel	6	2
Plástico mole	17	23
Plástico duro	7	32
Metais	2	6
Vidros	6	12
Solo	-	17
Outros	4	8



Figura 1. RSU do aterro controlado de São Carlos-SP: (a) Jovem; (b) Envelhecido.

2.2 Equipamento

O equipamento desenvolvido para esta pesquisa consiste em um edômetro de grandes dimensões construído no Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de São Carlos (LabGEO/UFSCar).

O equipamento é apresentado na Figura 2. Basicamente, o edômetro consiste em uma célula de parede rígida de aço inoxidável com um prato para a aplicação do carregamento que é instalado sobre o resíduo compactado. Este prato recebe as forças de maneira a permitir a compressão sob cargas progressivas. Tampas de

vedação inferior e superior são utilizadas para a vedação do sistema de modo a evitar a saída de líquidos de dentro do cilindro de aço. A saída e coleta do líquido percolado é realizada por meio de registros localizados na base a ao longo da altura do cilindro. O sistema de aplicação de carga consiste em um braço de alavanca de 1,5 m de comprimento que permite a amplificação de cinco vezes a força aplicada.



Figura 2. Edômetro de grande escala: (a) equipamento em funcionamento; (b) sistema de imposição e controle de temperatura; (c) medidas de deslocamento e tensão; (d) RSU compactado dentro do cilindro.

Ao longo de todo perímetro do cilindro em que o resíduo é compactado, resistências elétricas do tipo “braçadeira” foram instaladas, de forma a permitir o aquecimento da parede do cilindro. Este aquecimento é transferido para o resíduo compactado, o que permite avaliar o efeito da temperatura no RSU. Três termostatos foram posicionados em diferentes pontos no RSU de forma a permitir o controle da temperatura interna. Uma célula de carga e um LVDT foram utilizados para monitoramento dos deslocamentos verticais do prato no topo da massa de RSU.

2.3 Preparação e procedimento de ensaio

A primeira etapa da preparação da amostra de resíduo envelhecido consistiu na separação ou

corte de componentes que apresentassem tamanhos superiores a um décimo da largura interna do cilindro do edômetro. A segunda etapa consistiu em impor o teor de umidade inicial e o peso específico registrados por Abreu (2015) para amostras envelhecidas sob relativamente elevadas profundidades no aterro sanitário de São Carlos-SP. Dessa forma, buscou-se um teor de umidade de 40% e peso específico de 13 kN/m^3 . O RSU envelhecido foi compactado manualmente dentro do cilindro com uso de soquete, e com controle de compactação com base na massa de material a ser inserida dentro de um volume conhecido.

O procedimento de ensaio consistiu em aplicações de estágios de carregamentos até que a variação do deslocamento vertical do prato, ou seja, o deslocamento vertical do RSU, de uma leitura em relação a outra depois de 48 horas não ultrapassasse 10% da leitura anterior. Cabe informar que a estabilização das leituras é de difícil obtenção, uma vez que grande parcela do RSU é composta por plásticos, que podem sofrer fluência, principalmente sob elevadas temperaturas. Optou-se por estágio de tensões de 3, 10, 20, 40 e 80 kPa.

Nesta pesquisa, foram conduzidos ensaios com três diferentes níveis de temperatura: ambiente (25°C); 50°C e 70°C . A Tabela 2 resume os ensaios realizados. Durante o ensaio, circulou-se um volume de chorume de 60 l/dia em três intervalos de 20 l, de forma a manter o chorume umedecido ao longo de todo o ensaio.

Tabela 2. Resumo dos ensaios realizados

Ensaio	Condições	
	T $^\circ \text{C}$	Tensões verticais
E1-A	25°C	3, 10, 20, 40, 80 kPa
E2-50	50°C	3, 10, 20, 40, 80 kPa
E3-70	70°C	3, 10, 20, 40, 80 kPa

3 RESULTADOS

Na Figura 3 são apresentadas a evolução das deformações verticais acumuladas ao longo do tempo, sob três diferentes condições de temperatura para o RSU envelhecido. Na Figura 3, fica evidente que sob 25°C de temperatura interna do RSU, as deformações verticais são, de modo geral, menores do que aquelas registradas quando o RSU foi submetido à

temperaturas maiores. Ainda, as taxas de deformações aumentaram ao longo do tempo para todas as temperaturas e tensões, sendo mais intensas com aumentos destes parâmetros.

Nota-se ainda na Figura 3 que não houve diferença significativa nos níveis de deformações verticais quando as temperaturas internas de 50° C e 70° C são comparadas. Outro aspecto importante de ser notado foi a dificuldade de estabilização das leituras sob maiores temperaturas. Nota-se na Figura 3 que, as deformações vão aumentando sem sinal de estabilização, o que pode ser atribuído ao comportamento de fluência da parcela de materiais plásticos que compõe o RSU que, para fins práticos é uma taxa significativa para um RSU que sofreu degradação da parcela orgânica. Verifica-se também que o comportamento de fluência é mais intenso para a maior temperatura imposta e para os maiores níveis de tensões.

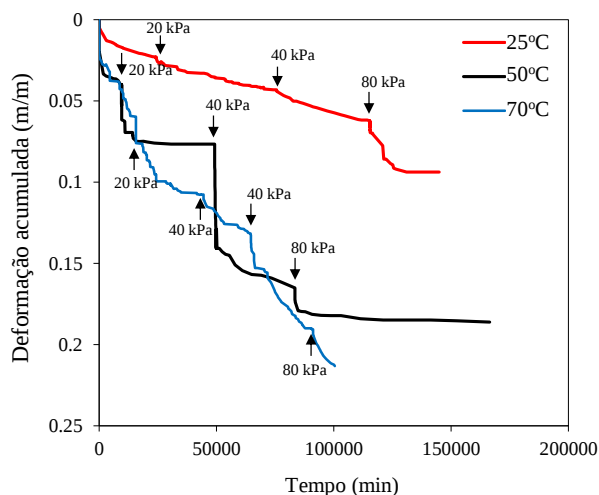


Figura 3. Evolução das deformações verticais acumuladas no RSU ao longo do tempo para os diferentes estágios de tensões e temperaturas impostas.

No aspecto prático, pode-se argumentar que as temperaturas internas registradas em regiões de aterros são relativamente pequenas, em torno de 30° C (Abreu, 2015), e este fenômeno de fluência pode não ocorrer de forma significativa. No entanto, no caso de haver alguma fonte de aquecimento, este comportamento pode ser prejudicial, principalmente em aterros na situação de pós-fechamento, por promover tensionamentos ou

trincamentos dos elementos que compõem camadas de fechamento de um aterro sanitário.

De forma a observar o comportamento de fluência, as deformações em cada estágio de tensões são plotadas em escala semi-logarítmica na Figura 4.

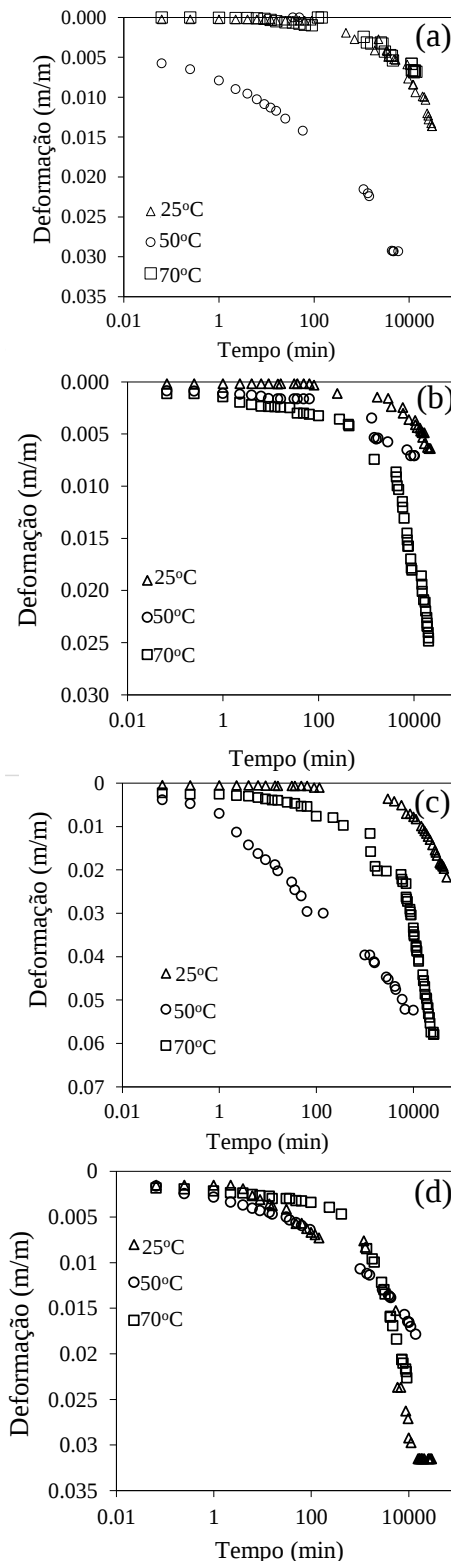


Figura 4. Deformação versus tempo em escala semi-log para as tensões: (a) 10 kPa; (b) 20 kPa; (c) 40 kPa; (d) 80 kPa.

Verifica-se na Figura 4 que, de forma geral, as deformações verticais verificadas para a temperatura ambiente apresentaram uma reduzida taxa de deformação com o tempo para todos os níveis de tensões quando comparados aos demais níveis de temperatura. Nota-se ainda que, uma maior taxa de deformação com o tempo é verificada para a maior temperatura interna imposta. É importante destacar que a taxa de aumento da deformação com o tempo é significativa para fins operacionais nos aterros sanitários. Salienta-se também que o RSU avaliado nesta pesquisa consiste em um material com grande quantidade de materiais plásticos (55%). Com isso, pode-se supor que o comportamento evidenciado é dependente da composição gravimétrica do RSU.

Na Figura 5 são apresentadas as relações entre deformação e tensão vertical aplicada. O coeficiente angular do ajuste linear gera um parâmetro que pode ser chamado de índice de compressão (C_c) do RSU (Bareither et al., 2012). Este é um parâmetro muito comum na análise de compressibilidade de solo a partir de ensaios de adensamento, embora em solos a relação seja entre índice de vazios e tensão vertical aplicada.

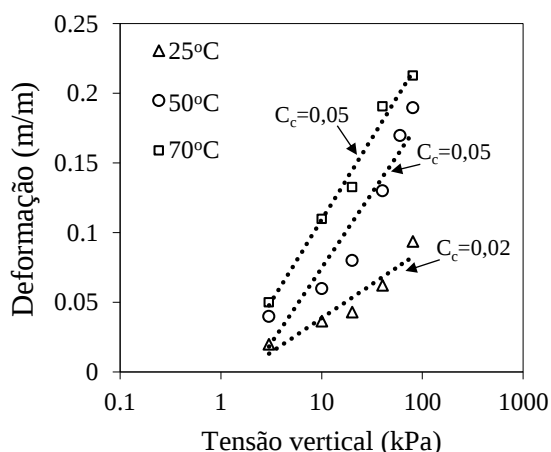


Figura 5. Parâmetros de compressibilidade do RSU sob diferentes temperaturas.

Com base na relação obtida na Figura 4, o índice de compressão do RSU sob a temperatura de 25° C é de 0,02, enquanto para as curvas referentes às temperaturas de 50° C e 70° C este valor aumenta para 0,05, ou seja, mais do que o dobro. Estes resultados indicam

que este RSU pode ser até duas vezes mais deformável em condições operacionais.

Temperaturas acima de 70° C não foram avaliadas, uma vez que os níveis de temperaturas internas em aterros sanitários dificilmente ultrapassam 50° C.

4 CONCLUSÕES

A presente pesquisa consistiu em verificar o comportamento de deformabilidade de um RSU com alto grau de degradação (30 anos) sob diferentes níveis de temperatura. Para tanto, construiu-se um edômetro de grande escala que permite a imposição e o controle de temperaturas. A pesquisa foi conduzida com um RSU com alto grau de degradação (pós-aterramento). Este programa experimental permitiu obter as seguintes conclusões:

- O índice de compressão do RSU envelhecido aumentou na ordem de 2 vezes quando submetido a uma temperatura de 50° C em relação à temperatura ambiente. O índice de compressão deste resíduo não mostrou alteração quando nas temperaturas de 50° C e 70° C;
- Notou-se que as deformações verticais ao longo do tempo são, em sua maior parte, provenientes do comportamento de fluência da parcela de material plástico, muito significativa em amostras degradadas;
- Como a fluência de polímeros é um comportamento dependente da temperatura, esta foi mais intensa quanto maior a temperatura imposta;
- A temperatura elevada gerou recalques significativos em relação à temperatura ambiente. Embora resíduos mais degradados não apresentem grande atividade biológica, o que geraria maiores temperaturas, qualquer fonte de aquecimento pode resultar em efeitos maléficos em aterro sanitários pós-encerramento, tais como recalques significativos.

Análises químicas dos líquidos produzidos (ou percolados) nos resíduos sólidos jovem e envelhecido serão conduzidas na busca de indicativos dos níveis de decomposição destes dentro do sistema de ensaio. Estes resultados consistem em uma análise parcial de

um projeto de pesquisa sobre o efeito da temperatura e da decomposição nos parâmetros de compressibilidade de resíduos sólidos urbanos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Projeto Universal 2013) pelo financiamento desta pesquisa e ao Laboratório de Geotecnia da UFSCar (LabGEO/UFSCar).

REFERÊNCIAS

- Abreu, A. E. (2015). Investigação Geofísica e resistência ao cisalhamento de resíduo sólidos urbanos de diferentes idades. Tese de doutorado, EESC/USP, 221p.
- Bareither, C. A., Benson, C. H., Edil, T. B., Barlaz, M. A. (2012). Abiotic and Biotic compression of municipal solid waste .Journal of Geotech. Geoenvironmental engineering, Vol. 138, No 8, pp. 877-888.
- Chen, Y., Ke, H., Fredlund, D. G., Zhan, L., Xie, Yan (2010). Secondary compression of municipal solid wastes and a compression model for predicting settlement of municipl solid waste landfills. J.Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 136, pp. 706-717.
- Gourc, J. P., Staub, M. J., and Conte, M. (2010).“Decoupling MSW settlement into mechanical and biochemical processes–modeling and validation on large-scale setups.” Waste Manage., 30(8–9), pp. 1556–1568.
- Ling, H. I., Leshchinsky, D., Mohri, Y., and Kawabata, T. (1998).“Estimation of municipal solid waste landfill settlement.”J. Geotech. Geoenviron. Eng., 124(1), pp. 21–28.
- Rao, M. S., and Singh, S. P. (2004). “Bioenergy conversion studies of organic fraction of MSW: Kinetic studies and gas yield-organic loading relationships for process optimization.” Bioresour. Technol., 95(2), 173–185.
- Sharma, H. D., and De, A. (2007). “Municipal solid waste landfill settlement: Postclosure perspectives.” J. Geotech. Geoenviron. Eng., 133(6),619–629.
- Sivakumar Babu, G. L. S., Reddy, K. R., Chouskey, S. K., and Kulkarni, H. S. (2010). “Prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement using constitutive model.”Pract. Period. Hazard. Toxic Radioact. Waste Manage., 14(2), 139–150.