

# Microbiologia de resíduos sólidos urbanos e sua relação com a deformação vertical da massa aterrada

*Microbiology of municipal solid waste and its relation to the vertical deflection of the mass grounded*

Márcio Camargo de Melo<sup>1</sup>, Kellianny Oliveira Aires<sup>2</sup>, Márbara Vilar de Araújo Almeida<sup>3</sup>, Veruschka Escarião Dessoles Monteiro<sup>4</sup>

## RESUMO

Em aterros de resíduos sólidos urbanos, os recalques – ou redução da altura e volume da massa de resíduos – ocorrem, principalmente, devido à degradação da matéria orgânica por microrganismos. O objetivo deste trabalho é analisar os recalques sob o aspecto microbiológico em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos localizada na Universidade Federal de Campina Grande, na Paraíba. O estudo abrangeu as etapas de construção, coleta, amostragem e enchimento da célula experimental com os resíduos sólidos de três bairros da cidade, baseados no critério de condição social, de modo a se obter uma amostra de resíduos representativa. A célula experimental foi instrumentada com medidores de recalque superficial e em profundidade para leitura do deslocamento vertical da massa aterrada. Foram observados ciclos de recalques seguidos de recalques zero, que são períodos de atividade microbiana intensa com aumento de vazios progressivos. De acordo com os estudos desenvolvidos neste trabalho, os recalques no interior da massa de resíduos devem ser compreendidos como resultado de atividade microbiana e comportamentos mecânicos, pois os períodos de recalques zero são consequência de atividade microbiana, bem como os períodos de recalques propriamente ditos.

**Palavras-chave:** resíduos sólidos urbanos; célula experimental; recalques; microbiologia.

## ABSTRACT

In municipal solid waste landfills, the settlements – or reduction of height and volume of the solid waste mass – occur especially due to organic matter degradation by microorganisms. The purpose of this paper is to analyze the settlements according to the microbiological aspect in an experimental cell of municipal solid waste located in the Federal University of Campina Grande, Paraíba, Brazil. This study involved several stages as construction, collection, sampling and filling the experimental cell with the solid waste originated from three districts of Campina Grande city based on the criterion of social condition and in this way getting a representative solid waste sample. The experimental cell was instrumented with superficial and in depth settlements plates for the reading of vertical displacement landfilled mass. Cycles of settlements followed by zero settlements – periods of intense microbial activities and with an increase of progressive empty spaces – were observed. According to the studies developed in this paper, the settlements in the interior of the waste mass must be understood as the result of microbial activity and mechanical behavior, since the periods of zero settlements are a consequence of the microbial activity as well as the settlements periods.

**Keywords:** municipal solid waste; experimental cell; settlements; microbiology.

<sup>1</sup>Doutor em Ciências e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFCG – Campina Grande (PB), Brasil.

<sup>2</sup>Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) – Campina Grande (PB), Brasil.

<sup>3</sup>Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental pela UFCG – Campina Grande (PB), Brasil.

<sup>4</sup>Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Professora do Departamento de Engenharia Civil da UFCG – Campina Grande (PB), Brasil.

**Endereço para correspondência:** Márcio Camargo de Melo – Rua Adenoste Roberto, 150, apto. 101 – Catolé – 58410-193 – Campina Grande (PB), Brasil – E-mail: melomc90@gmail.com

**Recebido:** 28/09/12 – **Aceito:** 27/11/13 – **Reg. ABES:** 635

## INTRODUÇÃO

A engenharia geotécnica convencional define recalque como a deformação vertical positiva do terreno proveniente da aplicação de cargas externas ou do seu peso próprio. No caso de aterros de resíduos sólidos urbanos esses recalques podem ser definidos como deslocamentos verticais descendentes da superfície do aterro, provocados por cargas externas, peso próprio dos resíduos ou camada de cobertura e principalmente devido à degradação biológica dos resíduos depositados. Nesse caso, o maior contribuinte para que os recalques ocorram é a matéria orgânica presente no interior da massa de resíduos, e quanto maior a sua concentração, maior será o recalque. Em aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), os recalques — ou a redução da altura e do volume da massa de resíduos — são frutos da perda de massa sólida dos seus constituintes orgânicos ou então devido a rearranjos, distorções e outros fatores que façam com que os resíduos diminuam em volume e massa.

Uma propriedade muito importante que está relacionada ao comportamento de aterros de RSU é a deformabilidade dos resíduos ali depositados. Conforme Nascimento (2007), os estudos de recalques são de grande importância para a avaliação dos seus componentes, tais como camadas de cobertura final, sistemas de drenagem de líquidos e gases, entre outros aspectos. Kudrna (2009) e Sharma e De (2007) mostram em seus trabalhos a importância de se avaliar recalques para prever o uso da área para outras atividades com um mínimo de segurança possível. Entretanto, deve-se levar em consideração que, de fato, muitos pesquisadores não exploram qual é a participação efetiva dos microrganismos no comportamento de recalques. Isso se torna difícil pela dificuldade de se compreender como o crescimento microbiano e a sua relação com o decréscimo da matéria orgânica estão relacionados com os recalques.

Para que ocorram os recalques, devido à degradação da matéria orgânica, inúmeros e complexos processos de degradação biológica e vias metabólicas dependentes de fatores ambientais no interior da massa de resíduos também devem ocorrer. Sabe-se que o crescimento microbiano pode não estar intimamente relacionado com os recalques, mas sim com uma adaptação ao meio conforme sugerem Melo (2003) e McDougall *et al.* (2004). Portanto, entender como ocorre essa dinâmica de crescimento microbiano *versus* mecanismos de recalques é importante para se prever essas deformações e até direcioná-las no sentido de ocorrerem mais rapidamente.

O objetivo deste trabalho é analisar os recalques sob o aspecto microbiológico em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos. Este estudo pode ser aplicado na gestão de aterro de RSU no que se refere ao comportamento de recalques associados à degradação de matéria orgânica e ao crescimento microbiano, e partir destas informações direcionar o comportamento das deformações verticais para a melhor eficiência de aterros.

## METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa foi construída uma célula experimental em alvenaria de tijolos manuais, com 2 m de diâmetro e com 3 m altura, com volume aproximado de 9 m<sup>3</sup>. A célula experimental foi construída no campus da Universidade Federal de Campina Grande e foi instrumentada com medidores de recalques superficiais (Placas A e B) e em profundidade, termopares para a obtenção de dados referentes à temperatura, piezômetros para o monitoramento do nível de líquidos e drenos de gás para quantificar o biogás gerado (Figura 1). Para as camadas de base e cobertura da célula experimental foi escolhido um solo com características de baixa permeabilidade (velocidade: 10<sup>-7</sup> m.s<sup>-1</sup>).

No estudo direcionado ao comportamento de recalques optou-se pela divisão dos extratos de resíduos da célula experimental em três camadas (Figura 1), que vão desde as placas superficiais (posicionadas imediatamente abaixo da camada de cobertura de solo compactado) até a profundidade onde está posicionada a placa inferior (apoiada sobre a camada de base de solo compactado). A camada superior corresponde ao extrato que coincide com a posição das placas superficiais até a placa 3 (P<sub>3</sub>). A camada intermediária fica situada entre a placa 3 (P<sub>3</sub>) e placa 4 (P<sub>4</sub>); e a camada inferior fica entre as placas 4 (P<sub>4</sub>) a 6 (P<sub>6</sub>). Assim, a camada superior possui uma espessura de 430 mm, a camada intermediária tem 680 mm e a inferior possui 890 mm, perfazendo um total de 2.000 mm de altura de resíduos sólidos urbanos.

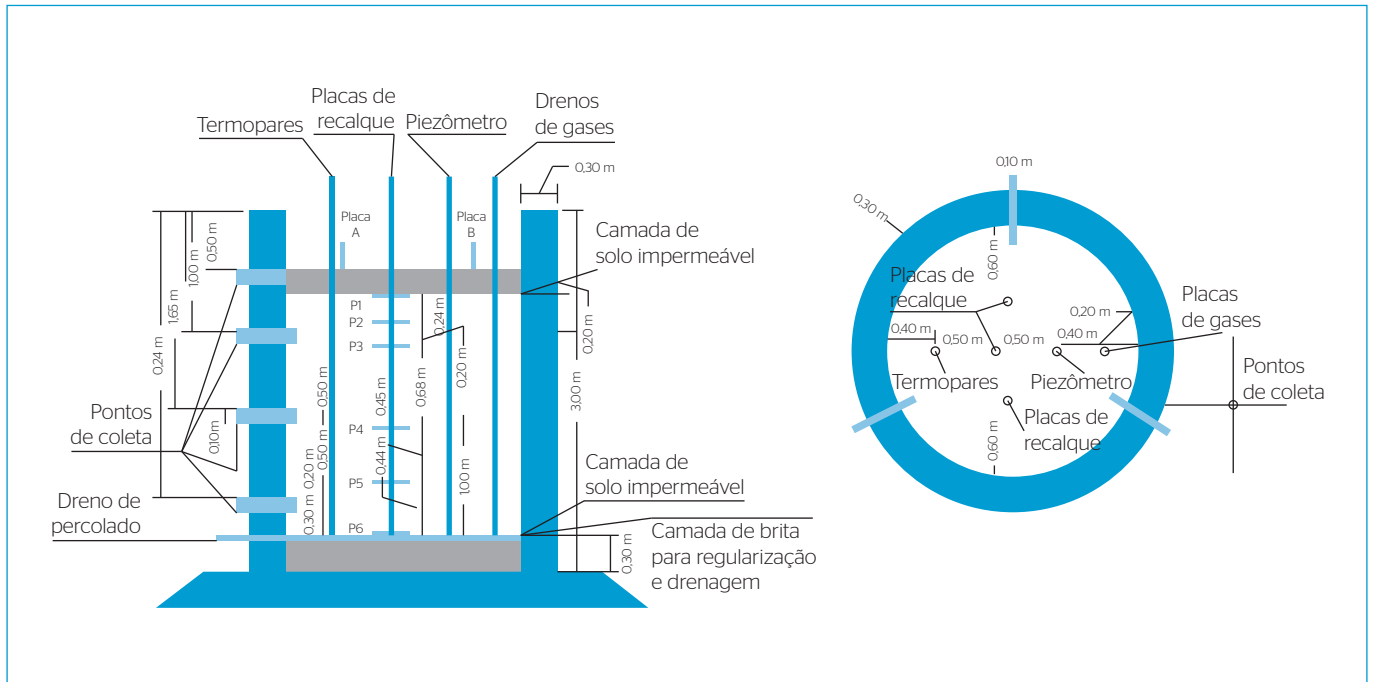
É importante ressaltar que sobre a camada superior de resíduos há a camada de cobertura, que possui 200 mm de espessura e, sob a placa 6 (0 mm) também há uma camada de base de solo compactado com 300 mm de espessura.

### Coleta, amostragem de resíduos e enchimento da célula experimental

Para a realização da coleta e amostragem foi utilizado o procedimento recomendado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 10.007 (ABNT, 2004). Após a coleta dos resíduos, foi realizada a sua homogeneização, baseada na metodologia de Lipor (2000) e adaptado por Leite (2008) e Pereira *et al.* (2010).

Posteriormente ao processo de homogeneização e quartearamento dos RSU provenientes da rota selecionada para a pesquisa, foi obtida a amostra final, de onde foram retiradas as parcelas para preenchimento da célula experimental.

As rotas selecionadas compreenderam três bairros da cidade de Campina Grande, Paraíba, baseados no critério de condição social, de modo a se obter uma amostra representativa desses resíduos. Os bairros selecionados foram: Mirante, Catolé e Sandra Cavalcante, respectivamente, bairros de classe alta, média e baixa.



**Figura 1** - Croqui da célula experimental construída em local cedido pela Universidade Federal de Campina Grande.

## Exames microbiológicos

Os exames microbiológicos foram realizados para quantificar as bactérias anaeróbias. As análises de anaeróbios estão de acordo com a metodologia da CETESB (2007). É importante ressaltar que neste estudo foi realizada apenas a quantificação de bactérias anaeróbias.

As amostras foram coletadas na célula experimental pelos pontos laterais de coleta dos resíduos (Figura 1) em diferentes profundidades (2,40; 1,65; 1,0 e 0,5 m) através de um amostrador com formato helicoidal especialmente confeccionado para este fim. A profundidade de 0,5 m foi desativada logo na primeira coleta de amostras devido ao recalque imediato ocasionado pelo peso da camada de cobertura, o qual foi bastante elevado.

## Semeadura de anaeróbios totais

As amostras de resíduos sólidos foram coletadas e armazenadas em uma jarra de anaerobiose. Foi colocada uma placa *anaerobac* com o objetivo de diminuir a quantidade de oxigênio presente no meio e aumentar o gás carbônico no interior da jarra.

## Preparação do tampão redutor

Para a determinação de microrganismos anaeróbios totais, primeiro foram utilizados tubos de penicilina contendo tampão redutor (TRD). A cada tubo de penicilina foi adicionado 4,5 ml de Tampão Redutor. Em seguida, esses tubos foram purgados com  $N_2$  (a inserção de  $N_2$  líquido permite a eliminação de  $O_2$ ) durante 25 minutos e autoclavados por 15 minutos a 121°C.

## Preparação do meio tioglicolato

Também foram preparados tubos do tipo penicilina com 9 mL de meio tioglicolato para posterior inóculo da amostra.

## Inóculo

Em condições anaeróbias, com uma seringa de 5 ml foi retirado 1 mL dos frascos que continham as amostras de resíduos sólidos, sendo este adicionado em um frasco de TRD. Do frasco ao qual foi adicionado 1 mL de amostra foi retirado 1 mL para um próximo frasco de TRD, e assim sucessivamente até serem selecionadas as diluições que favoreceriam o crescimento, as quais foram  $10^{-1}$  a  $10^{-14}$ . Destas diluições selecionadas foi retirado 1 mL, já contendo o inóculo das amostras, utilizando também seringa e adicionando nos tubos contendo 9 mL de meio tioglicolato em triplicata. Em seguida, os tubos contendo meio tioglicolato, já inoculados com a amostra, foram acondicionados em estufa a 37 °C, durante 96 horas. Os frascos que apresentaram turvação foram considerados positivos para anaeróbios totais.

## Contagem de anaeróbios totais

Após o período de 48 horas fez-se o cálculo do Número Mais Provável (NMP). O método de NMP baseia-se no princípio de que as bactérias presentes numa amostra podem ser separadas umas das outras por agitação, resultando em suspensão de células bacterianas individuais, uniformemente distribuídas na amostra original. Adotou-se como resultado a série em que houve crescimento na maior diluição em triplicatas

(apenas a ordem de grandeza). Com esse resultado calculou-se o NMP através do programa MPN calculator.

O programa permite a entrada de dados como número de tubos de ensaio, diluições e quantidade de tubos positivos (crescimento bacteriano). Com os dados inseridos no programa, esse calcula o NMP com 95% de probabilidade de estar correto.

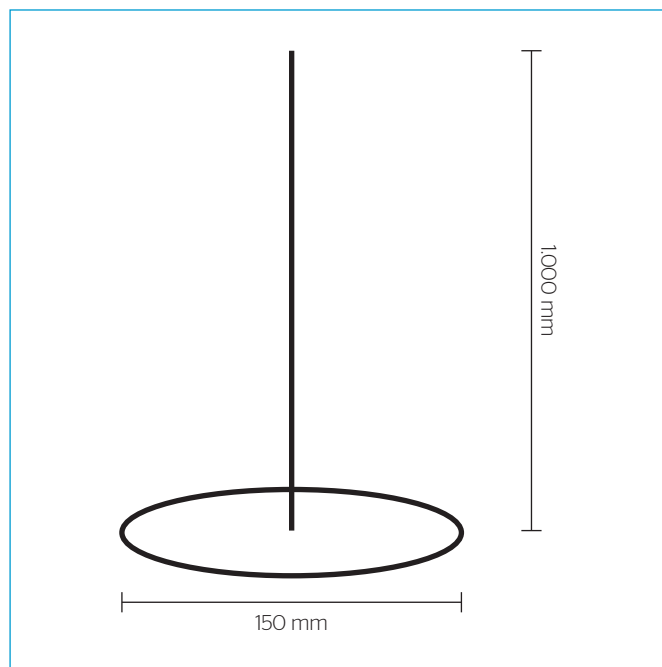
O programa MPN calculator foi utilizado devido ao seu cálculo ser mais preciso do que o NMP padrão utilizado frequentemente para poucas diluições. Este programa inclusive substituiu a tabela de NMP, pois apresenta dados para várias diluições que não estão presentes na tabela padrão.

## Recalques

Previamente foram instalados medidores de recalque superficial e em profundidade na célula experimental. Para o monitoramento de recalques superficiais foram utilizadas duas placas circulares com diâmetros aproximados de 150 mm (Figura 2), confeccionadas em aço e revestidas com uma película anticorrosiva.

Durante o enchimento da célula, ao atingir a altura pré-estabelecida de resíduos, fez-se um nivelamento da camada superficial, onde foram instaladas as duas placas de recalques superficiais. Em seguida foi colocado um tubo de PVC de 20 mm para evitar o atrito entre o solo e a haste da placa e para impedir a entrada de umidade no sistema. Posteriormente, foi depositada uma camada de cobertura de solo compactado de 200 mm.

Para se medir os recalques em profundidades foram instaladas previamente placas de recalques em profundidade, que possuem em



**Figura 2** - Desenho esquemático de uma placa de recalque superficial.

seu centro um ímã, que ao se enviar um torpedo permite a obtenção da leitura, uma vez que este sistema aciona um dispositivo eletrônico e, então, se mede o deslocamento vertical da placa.

As leituras dos recalques superficiais e em profundidade seguiram o procedimento descrito a seguir:

- Placas superficiais: estendeu-se um fio auxiliar horizontalmente de um lado a outro da abertura da célula experimental, mantendo-o nivelado sobre as duas placas superficiais. Mediu-se então a distância vertical do fio até o indicador da posição das placas.
- Placas em profundidade: foram utilizadas seis placas magnéticas em diferentes profundidades. As placas magnéticas são providas de um anel com ímã permanente, com orifício central destinado à passagem de tubo guia de PVC. A leitura foi realizada introduzindo-se um sensor de campo magnético dentro do tubo guia, que identifica a localização da placa magnética e aciona o ohmímetro analógico, modelo FT-1000 A, que exibe um sinal por meio de um ponteiro móvel, possibilitando a leitura de recalques.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Microbiologia e sua relação com os recalques

Foi verificado que os recalques que ocorreram no interior da massa de resíduos foram descontínuos e sucessivos. Tanto os recalques superficiais como os em profundidade ocorreram continuamente durante um determinado tempo, e após este período tinha-se recalques zero. Estes períodos de recalques zero, assim chamados por Melo (2003) e McDougall *et al.* (2004), se dão por aumento de vazios com intensa atividade biológica. Na célula experimental estudada, em todas as profundidades, o número de bactérias anaeróbias totais presentes foi muito semelhante e elevado ( $10^{10}$  a  $10^{11}$ ), e em diversos períodos, ocorrendo ou não recalques (Figuras 3 a 5).

As Figuras 3 a 5 mostram que as bactérias anaeróbias, que são os indicadores mais utilizados no monitoramento de recalques, sempre estiveram elevadas, com exceção dos primeiros 30 dias. Nesses primeiros dias ocorreram recalques, mas esses não podem ser atribuídos à decomposição da matéria orgânica e sim ao próprio peso dos resíduos. Em todas as profundidades, em torno dos 60 aos 150 dias, não ocorreram recalques, mas sim um período de recalques zero. Porém, nesses dias a atividade microbiana foi intensa, não podendo afirmar que apenas as quantidades elevadas de microrganismos são diretamente ligadas aos recalques.

Melo (2003), em estudos com células em escala real no Aterro da Muribeca, na Região Metropolitana do Recife, Pernambuco, observou o mesmo comportamento dos recalques e microrganismos no tempo e em todas as profundidades analisadas. O mesmo estudo mostrou que os vazios no interior da massa de resíduos aumentam no período de

recalques zero, mas devido aos sucessivos decréscimos nos pesos das camadas de resíduos, a carga imposta nestes vazios diminui e, portanto, a força de compressão nas camadas é menor, o que dificulta os recalques. Esses só vão ocorrer quando os vazios forem tão grandes que não suportem mais a carga imposta, implicando em colapsos. Desta forma, a cada ciclo de recalques seguido de recalques zero, os vazios serão maiores e, portanto, mais tempo decorrerá para formá-los e, também o período de recalques zero será maior. Este comportamento é mais claramente visto na camada superior (Figura 3) e na inferior (Figura 5) da célula experimental estudada.

Fica bastante evidente que o monitoramento da biota microbiana de aterros deve ser um fator complementar no que se refere aos recalques. Fatores mecânicos, físicos, químicos e físico-químicos devem ser analisados junto aos microrganismos, já que a presença desses últimos não implica diretamente na ocorrência de recalques.

No que se refere aos recalques zero, Monteiro *et al.* (2006) relata que em camadas inferiores esses são melhores observados, principalmente se o sistema de drenagem for deficiente. Isto porque os líquidos acumulados distribuem as pressões em todas as direções, dificultando os recalques. Embora tenham ocorrido recalques zero na camada inferior de resíduos da célula experimental estudada, esses não foram tão pronunciados como esperado. Um dos fatores foi, provavelmente, a ausência ou a pequena quantidade de líquidos nesta profundidade. Inclusive, durante o monitoramento não foi observada a presença de lixiviado no sistema de drenagem, visto que a cidade de Campina Grande possui um déficit hídrico anual (ALVES, 2012).

Na camada superior houve uma rápida depleção da matéria orgânica. Segundo Audibert (2011), as diferenças de temperatura existentes entre o ambiente externo e o ambiente interno podem fornecer calor ou extrair calor da massa de resíduos. Comumente há perda de calor para o exterior, situação típica de invernos prolongados, e a baixas temperaturas tendem a inibir os processos de biodecomposição pela inibição da ação das bactérias mesofílicas. Tem-se assim uma situação de dormência nos processos de biodecomposição anaeróbia. Em regiões de clima tropical, onde a amplitude de variação da temperatura entre o exterior e o interior se mostra menor, essas condições tendem a ser amenizadas (AIRES, 2013).

Na maior parte do período de monitoramento, a temperatura média no interior da célula experimental foi maior do que a temperatura ambiente. De uma maneira geral, as temperaturas externas influenciam o meio interno principalmente se a célula tiver uma grande área de superfície em relação ao volume. Melo (2011) relata que células experimentais têm áreas de superfícies maiores que o volume interno, favorecendo as trocas de energia e de matéria com o ambiente, o que pode acelerar o tempo de degradação dos compostos orgânicos. Isso pode estar relacionado à rápida depleção de matéria orgânica da célula experimental se comparada a aterros em escala real.

### Recalques por placas

O Quadro 1 mostra a posição das placas de recalques da superfície para a base da célula experimental. O Quadro 1 está de acordo com a Figura 1.

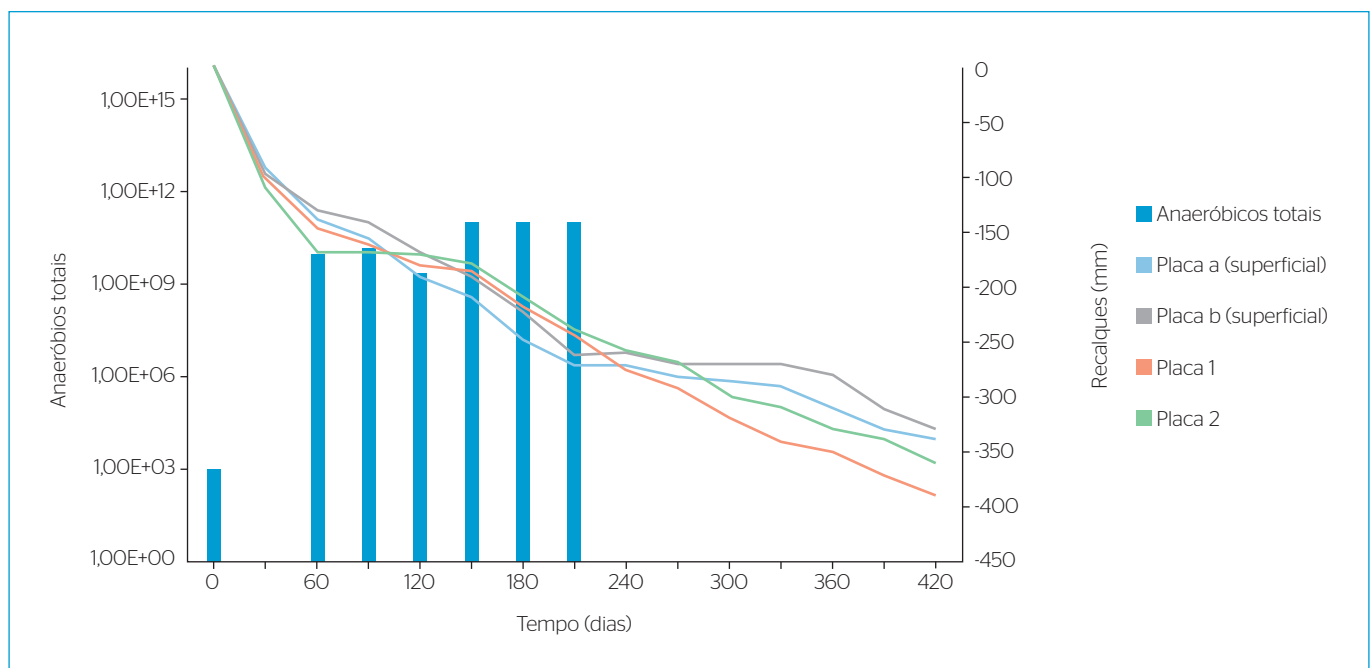


Figura 3 - Recalques versus anaeróbios totais no nível superior.

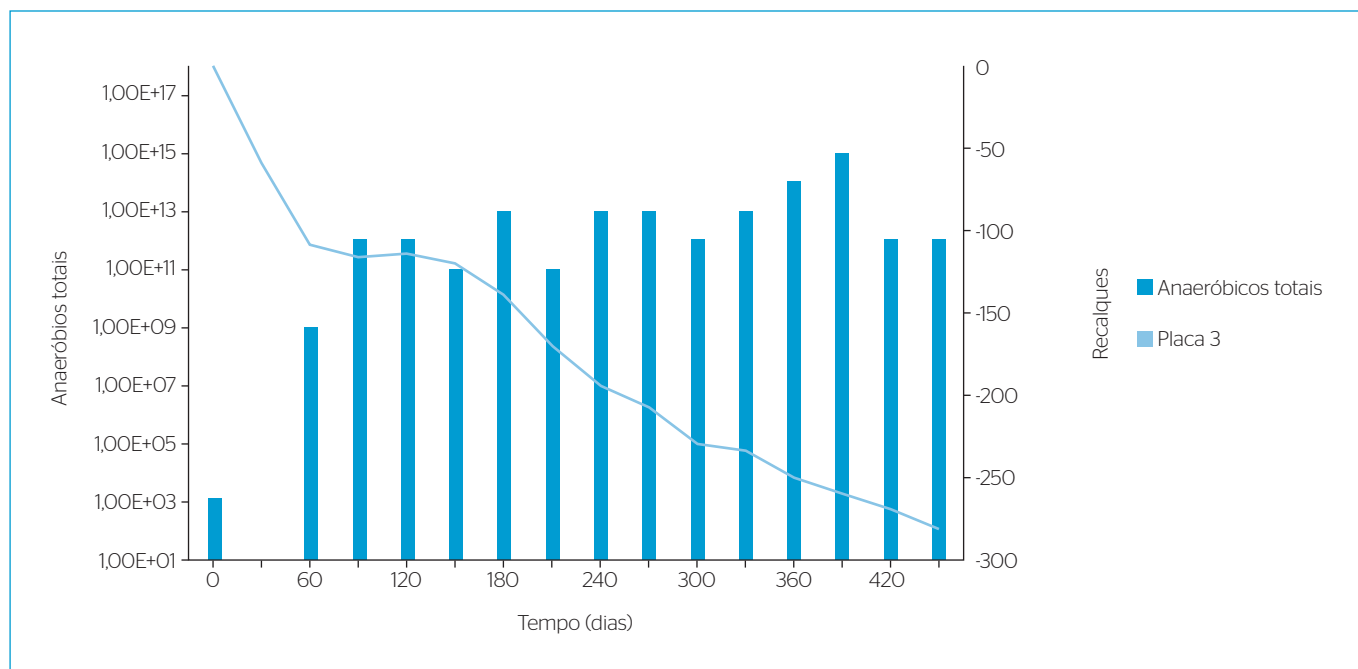


Figura 4 - Recalques versus anaeróbios totais no nível intermediário.

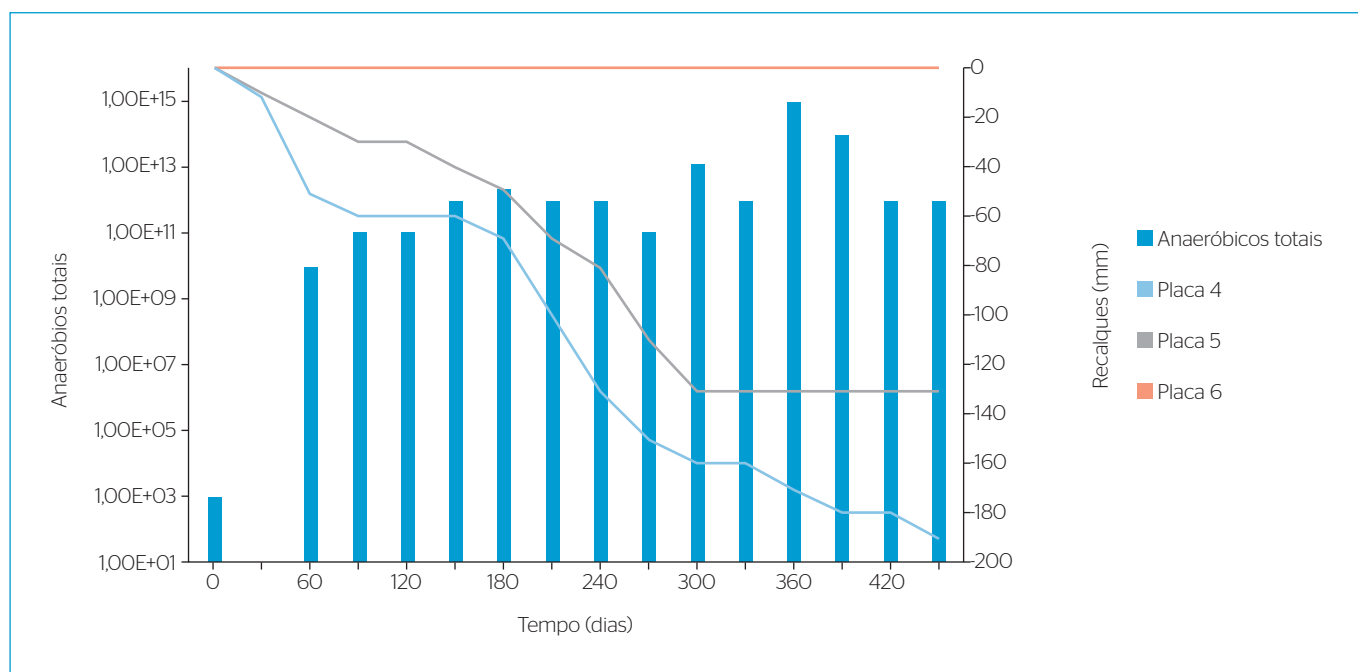


Figura 5 - Recalques versus anaeróbios totais no nível inferior.

Durante o período de monitoramento dos recalques em profundidade e ao longo do tempo (Figura 6), verificou-se que as maiores deformações ocorreram na placa 1 (0 mm), que fica situada no centro da célula experimental na camada superior, seguida da placa 2, que se encontra 230 mm distante da placa 1 em profundidade. Na placa 2 foi verificado que ocorreram 370 mm de recalques, e na placa 1 se obteve 400 mm de recalques até o final do monitoramento da célula experimental.

As placas superficiais “a” (situada à esquerda da placa 1) e “b” (situada à direita da placa 1) tiveram, respectivamente, 350 e 330 mm de recalques. Esses resultados eram previstos, já que estas placas estão a 2.000 mm da camada de base. Como já observado, as placas 1 e 2 tiveram maiores recalques do que as placas superficiais que estão situadas ao lado, pois na região central da célula a influência das paredes do lisímetro é menor. As paredes da célula interagem

com os resíduos que “descolam” e se movem em direção ao centro da célula, o que implica em maiores recalques na região central. Isso foi verificado por diversos pesquisadores estudando células experimentais em tamanho reduzido e em escalas reais (MELO, 2003; ALCÂNTARA, 2007; GARCEZ, 2009).

Os recalques observados na célula experimental estudada tiveram um comportamento bastante típico de células em escala real. Os recalques apresentados nas placas foram diminuindo em altura e em função da profundidade (Quadro 2).

Assim, em profundidades maiores os recalques foram menores. Em células de escala real, Mariano (1999), Melo (2003) e Monteiro (2003) verificaram que os recalques diminuem conforme a profundidade vai aumentando. Esse fato ocorre porque os resíduos nas camadas mais profundas são influenciados pela compactação, devido ao peso das camadas que estão acima, já que a espessura da camada vai diminuindo pela própria posição da placa e pela compactação mecânica, assim que os resíduos são depositados.

É importante lembrar que a compactação excessiva dos resíduos dificulta, inclusive, a biodegradação da matéria orgânica, mesmo que os resíduos sejam recentes. No caso de células com resíduos velhos, os recalques, efetivamente medidos, nas camadas mais profundas são menores pelo fato de que a matéria orgânica vai sendo consumida enquanto que o aterro foi crescendo em altura.

A placa 6 não apresentou deslocamento com o tempo por estar acima da camada de base de solo compactado, que é praticamente incompressível.

Durante os primeiros 30 dias, os recalques (Figura 6), como já comentado, ocorreram quase que exclusivamente associados ao peso da própria massa de resíduos e devido ao peso da camada de cobertura de solo compactado. Isso ocorre porque nos dias iniciais de monitoramento a biota microbiana, embora presente no interior da massa de resíduos, tem que se adaptar a esse ambiente interno e, portanto, os recalques são quase que na sua totalidade devido a fatores mecânicos

(VAZOLLER, 1989). Passada essa adaptação inicial, possivelmente os recalques ocorridos na célula experimental foram originados pela degradação da matéria orgânica associados ao próprio peso dos resíduos acima de cada placa de medição destes recalques.

A Figura 7 se refere à deformação específica e mostra que as placas superficiais (a e b) apresentaram, respectivamente, 17,5 e 16,5% de deformação em relação à altura inicial de resíduos (2.000 mm). A placa 1, situada no centro da célula experimental na camada superior, obteve uma deformação específica de 20%, e a placa 2 teve 18,5%. A placa 3, situada na camada intermediária, obteve uma deformação específica de 14% e as placas 4 e 5, situadas nas camadas inferiores, obtiveram uma deformação de 10 e 7%, respectivamente. A placa 6, por estar na base, não sofreu recalques com o passar do tempo. Todas as deformações específicas foram calculadas em relação às alturas dos resíduos abaixo das respectivas placas onde estão posicionadas.

A velocidade de recalques, conforme a Figura 8, mostra como foram significativos os recalques ocorridos nos primeiros 30 dias. A velocidade desses recalques, por placa, foi até 10 vezes maior que em algumas placas nos primeiros 30 dias, se comparado com os demais dias em que foram monitoradas as deformações verticais.

Contudo, de acordo com a Figura 7, os recalques passaram a ter velocidades menores após 90 dias de monitoramento. As placas 4 e 5 tiveram as menores velocidades de recalques com o tempo, se comparadas às demais placas. A placa 6, como já explicado, não apresenta variação de recalques com o tempo por estar situada na base da célula experimental.

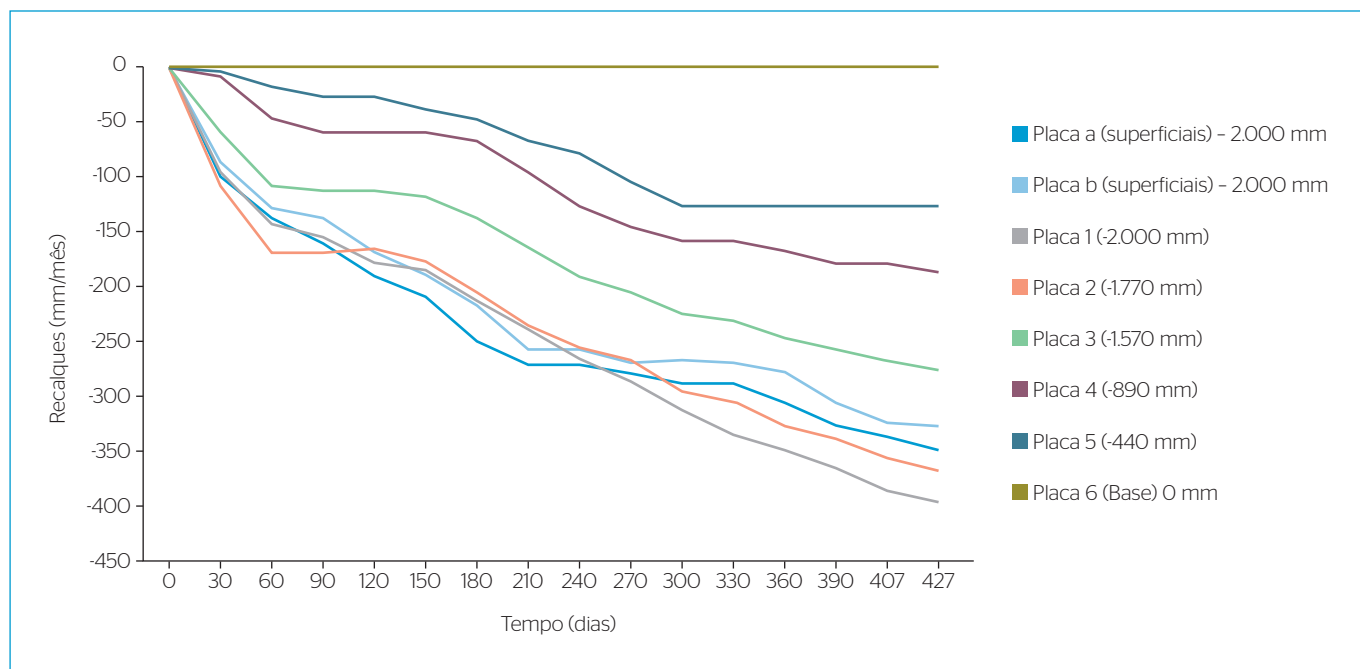
No que se refere somente à placa 5, esta apresentou velocidades de recalques zero após 330 dias de monitoramento, indicando que ou a matéria orgânica está inacessível aos microrganismos bacterianos para a sua degradação pela compactação excessiva, ou há um acúmulo de líquidos nessa profundidade, o que dificulta os recalques. A compactação excessiva pode dificultar a passagem de líquidos e, por consequência, a degradação de compostos orgânicos conforme Leite, Monteiro e Silva (2007).

**Quadro 1** - Posição das placas de recalques no interior da célula experimental.

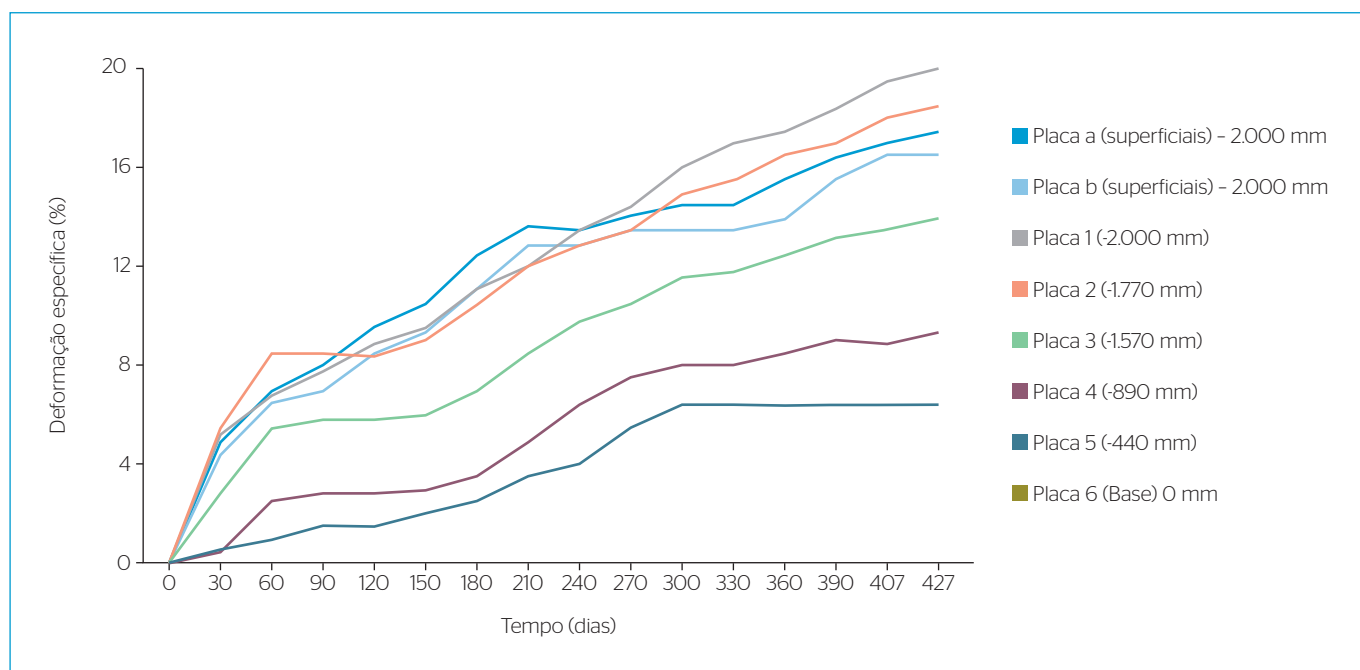
Placas	Posição das placas de recalques (mm)
Placa a - superficial	0
Placa b - superficial	0
Placa 1	0
Placa 2	-230
Placa 3	-430
Placa 4	-1110
Placa 5	-1560
Placa 6	-2000

**Quadro 2** - Recalques observados nas placas durante o tempo de monitoramento da célula experimental.

Placas	Recalques finais (mm)
Placa a - superficial	350
Placa b - superficial	330
Placa 1	400
Placa 2	370
Placa 3	280
Placa 4	190
Placa 5	130
Placa 6	0



**Figura 6** - Recalques superficiais em diferentes profundidades ao longo do tempo.

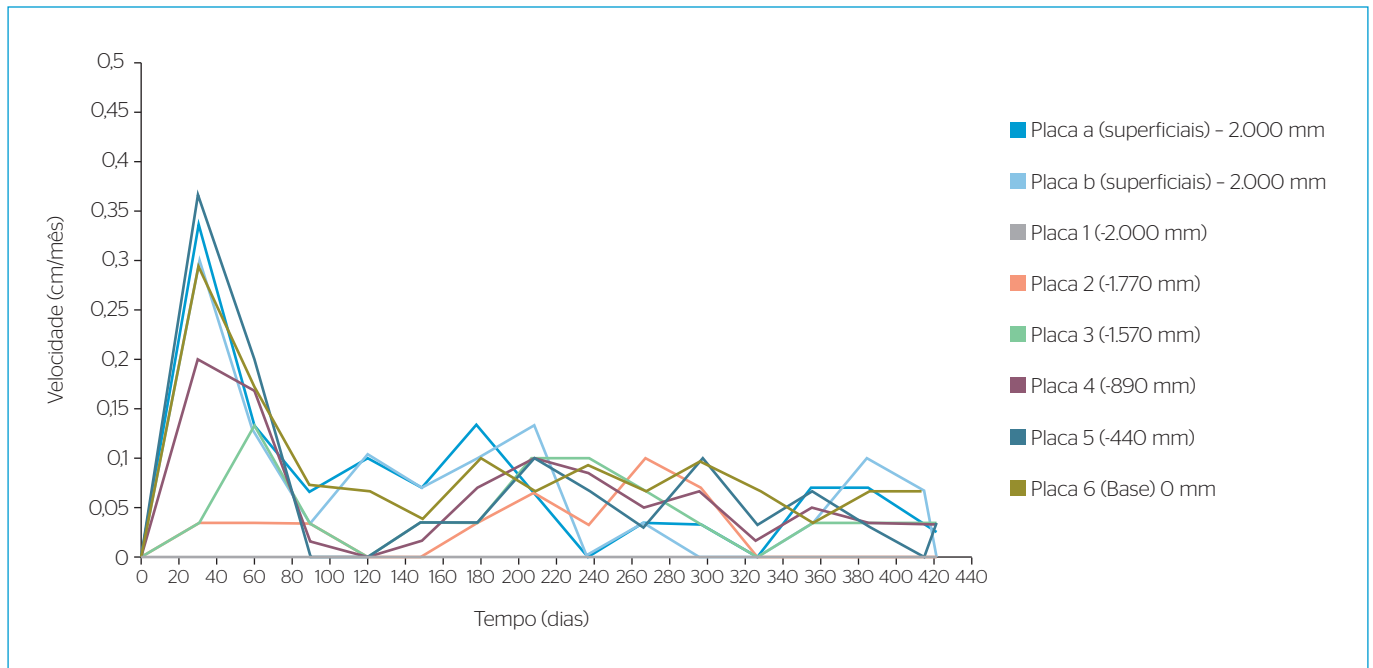


**Figura 7** - Deformação específica superficial em diferentes profundidades ao longo do tempo.

Nas demais placas, a velocidade e a ocorrência de recalques diminuiu com o tempo. Entretanto, a ocorrência de recalques deverá prosseguir em todas as placas estudadas, já que dentro da célula experimental há presença de matéria orgânica a ser degradada. É importante analisar que a velocidade dos recalques nas placas são menores após o período inicial de disposição de resíduos, e essas velocidades variam de 1,5 mm/mês a 0 mm/mês, e em ciclos,

o que poderia ser bastante contraditório, mas não é, pois há períodos de recalques zero, embora se tenha uma degradação intensa. Nos momentos nos quais a velocidade dos recalques cai a zero, ocorre a formação de vazios e, portanto, há biodegradação, conforme visto nas Figuras 3 a 5. O que deve ser levado em consideração, portanto, é o comportamento geral dos recalques, pois, como visto, suas velocidades variam consideravelmente.





**Figura 8** - Velocidade dos recalques superficiais em diferentes profundidades ao longo do tempo.

Finalmente, os recalques medidos por placa foram maiores na superfície e decresceram com a profundidade. O ambiente externo favoreceu a degradação da matéria orgânica e afetou os demais parâmetros estudados.

## CONCLUSÕES

De acordo com os resultados analisados, foi possível afirmar que os recalques em resíduos sólidos urbanos são fortemente influenciados pela matéria orgânica presente e, em menor escala, pelo peso dos próprios resíduos, sendo que este último contribui, quase que exclusivamente, nos primeiros 30 dias de aterramento.

Os resultados de recalques sugerem que, durante o monitoramento da célula experimental, a degradação dos resíduos foi bastante rápida se comparada a aterros em escala real. A camada superior

obteve os melhores resultados no que se refere a recalques e à degradação da matéria orgânica pelo fato de ser mais influenciada pelas condições ambientais locais.

Os recalques ocorridos no interior da célula experimental, sejam em profundidade ou no tempo, não tem uma relação estrita direta com o número de microrganismos, porém, de uma forma geral, a ocorrência de recalques é fruto da presença constante e elevada de microrganismos. Os recalques zero não implicam em inatividade microbiológica, mas, sim, em consumo de matéria orgânica elevada e, conseqüentemente, aumento de vazios no interior da massa de resíduos.

O acompanhamento, preferencialmente, dos microrganismos anaeróbios é importante como ferramenta para o monitoramento dos recalques e devem ser utilizados com outros parâmetros físicos, mecânicos, físico-químicos e químicos, pois somente a presença de microrganismos não implica em recalques no interior da massa de resíduos.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004) *NBR 10.007: Resíduos Sólidos - classificação*, Rio de Janeiro.

AIRES, K.O. (2013) *Monitoramento das concentrações de gases em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos na cidade de Campina Grande - PB*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

ALCÂNTARA, P.B. (2007) *Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ALVES, F.S. (2012) *Influência das condições meteorológicas na biodegradação dos resíduos sólidos urbanos em Campina Grande-PB*. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

AUDIBERT, J.L. (2011) *Avaliação qualitativa e quantitativa do biogás do aterro controlado de Londrina*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. (2007) *Inventário Estadual dos Resíduos Sólidos Domiciliares*. São Paulo: CETESB.

GARCEZ, L.R. (2009) *Estudo dos componentes tóxicos em um bioreator de resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande - PB*. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

KUDRNA, Z. (2009) Long-term deformations of municipal landfill bodies and their effects on functional safety of superficial sealing. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, v. 6, n. 4 (156), p. 465-473.

LEITE, H.E.A.S.; MONTEIRO, V.E.D.; SILVA, S.A. (2007) Uma proposta de estudo de recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos em escala experimental associados a biodegradação. *In: VI Congreso Chileno de Geotecnia, Anais...* Valparaíso, Chile: SOCHIGE.

LEITE, H.E.A.S. (2008) *Estudo do comportamento de aterros de RSU em um bioreator em escala experimental na cidade de Campina Grande - Paraíba*. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

LIPOR. (2000) Serviço intermunicipalizado de gestão de resíduos do grande porto: a caracterização dos resíduos sólidos. *Cadernos técnicos*, n. 1, p.142.

MARIANO, M.O.H. (1999) *Recalques no aterro de resíduos sólidos da Muribeca*. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MCDUGALL, J.R.; PYRAH, I.C.; YUEN, S.T.S.; MONTEIRO, V.E.D.; MELO, M.C.; JUCA, J.F.T. (2004) Decomposition and settlement in landfilled waste & other soil-like materials. *Geotechnique*, v. 54, n. 9, p. 605-610.

MELO, M.C. (2003) *Uma análise de recalques associada à biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca*. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MELO, M.C. (2011) *Estudo da matéria orgânica nos recalques de resíduos sólidos urbanos aterrados*. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

MONTEIRO, V.E.D. (2003) *Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do aterro de resíduos sólidos da Muribeca*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MONTEIRO, V.E.D.; MELO, M.C.; ALCÂNTARA, P.B.; ARAÚJO, J.M.; ALVES, I.R.F.S.; JUCÁ, J.F.T. (2006) Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 11, n. 3, p. 223-230.

NASCIMENTO, J.C.F. (2007) *Comportamento Mecânico dos Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

PEREIRA, F.T.G.; LEITE, H.E.A.; GARCEZ, L.R.; ARAÚJO, E.P.; MELO, M.C.; MONTEIRO, V.E.D. (2010) Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande-PB. *In: II Simpósio Nordeste de Resíduos Sólidos, Anais...*, Campina Grande, Paraíba.

SHARMA, H.D. & DE, A. (2007) Municipal solid waste landfill settlement: postclosure perspectives. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 133, n. 6, p. 619-629.

VAZOLLER, R.F. (1989) *Microbiologia e Saneamento Ambiental*. São Paulo: Ed. USP.