



Aplicação de Modelos Matemáticos para Previsão de Recalques do Aterro de Nova Iguaçu – RJ, Brasil

Application of Mathematical Models for the Prediction of Settlement in Nova Iguaçu Sanitary Landfill - RJ, Brazil

Annik Frasso Corrêa Klink , Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk 
& Júlio Cesar da Silva 

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
E-mails: annikfc@outlook.com; anavanelk@gmail.com; jcesarop@gmail.com

Resumo

O presente trabalho versa sobre uma análise de recalques em longo prazo à luz de cinco modelos teóricos de compressibilidade, os modelos de Sowers, Gandola *et al.*, Ling *et al.*, Meruelo e Oweis. Os valores dos recalques medidos durante 960 dias foram utilizados para prever recalques em 50 anos. O estudo foi realizado no aterro sanitário (CTR-NI) que está localizado na região metropolitana do Rio de Janeiro, sudeste do Brasil. O aterro recebe diariamente entre 3.500 e 6.000 toneladas de resíduos sólidos urbanos e industriais classe II, segundo classificação da ABNT NBR 10.004. Os recalques obtidos com o monitoramento variaram na faixa de 0,48% a 1,30% indicando que sob carga constante os recalques foram pouco significativos. Os modelos de previsão apresentaram curvas de recalques a curto prazo aproximadas, já a longo prazo destacam-se as previsões de Gandola *et al.* e Oweis que apresentaram valores consideravelmente maiores que os modelos de Sowers, Ling *et al.* e Meruelo. Os valores de previsão de recalques em 50 anos variaram entre 150 mm e 1000 mm aproximadamente, sendo mais significativos as previsões obtidas através do modelo de Oweis.

Palavras-chave: Recalques; Modelos de Previsão; Compressibilidade

Abstract

The present work deals with a long-term analysis of settlement in the light of five theoretical compressibility models, the models by Sowers, Gandola *et al.*, Ling *et al.*, Meruelo and Oweis. The settlement values measured over 960 days were used in a 50-year prediction of settlement. The study was conducted at a landfill (CTR-NI) located in the metropolitan region of Rio de Janeiro, southeastern Brazil. The landfill receives between 3,500 and 6,000 tons of municipal and industrial class II, according ABNT NBR 10004, Solid waste daily. The settlements obtained with the monitoring presented minor deformations, ranging from 0.48% to 1.30% indicating that under constant load were low significant settlements. The prediction models presented very approximate short-term settlement curves, while in the long term the Gandola *et al.* and Oweis predictions stand out, which presented considerably higher values than the models of Sowers, Ling *et al.* and Meruelo. The data of prediction of settlements in 50 years varied between 150 mm and 1000 mm approximately. The predictions obtained through the Oweis model are more significant.

Keywords: Settlement; Prediction Models; Compressibility

1 Introdução

Os aterros sanitários sofrem compressão durante a operação e após encerramento. Essa compressão pode durar um longo período de tempo e depende de muitos fatores, entre eles composição, idade e compactação dos resíduos, forma de operação do aterro, umidade e temperatura. Quantificar essa compressão através de relações matemáticas ainda é um desafio para projetistas. Este cálculo permite construir aterros sanitários com taludes mais elevados, assegurando sua estabilidade, maior controle sobre a camada final de cobertura e dos sistemas de drenagem, além de aumentar a vida útil do aterro, permitindo dispor maior volume de resíduos (Pereira, 2000).

Os conceitos formulados para a mecânica dos solos foram um ponto de partida para a compreensão do comportamento compressivo dos resíduos sólidos e formulação de modelos matemáticos. No entanto, há uma grande diferença entre esses materiais, os resíduos são heterogêneos e constituídos de uma fração orgânica responsável pelo processo de degradação, resultando em altos recalques e mudanças de características com o tempo.

Atualmente existem vários modelos para previsão de recalques em aterros sanitários. Modelos baseados em funções hiperbólicas, logarítmicas, de potência e exponenciais, que incorporam em uma única equação todos os tipos de recalques que ocorrem nos aterros e que são chamados por McDougall (2011) de modelos dependentes do tempo. O autor ressalta que esses modelos podem dar bons resultados desde que calibrados com dados de campo. Entretanto, existem modelos mais elaborados conceitualmente e que expressam em relações matemáticas os fenômenos que ocorrem nos aterros, como os modelos baseados nas relações constitutivas tensão-deformação, nos modelos de previsão de geração de biogás e os que incorporam os processos mecânicos, de biodegradação e de fluência.

Sagaseta (1995) observa que as leis de recalques versus tempo propostas devem apresentar certas características para que sejam conceituadas como recomendáveis: ser dimensionalmente corretas, definidas a partir de um pequeno número de parâmetros e que apresentem um significado físico ou estejam relacionados com uma propriedade conhecida. Mas, principalmente, que esses modelos possam fazer previsões realistas e precisas, dentro das limitações das funções matemáticas utilizadas.

Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo prever os recalques a partir dos dados de monitoramento em campo do aterro de Nova Iguaçu-RJ (CTR-NI) durante um período de 960 dias. O artigo faz uma análise da previsão de recalques utilizando cinco modelos teóricos de compressibilidade, os modelos de Sowers (1973),

de Gandola *et al.* (1994), Meruelo, Palma (1995), Ling *et al.* (1998) e Oweis (2006). Outro ponto importante abordado pelo artigo é avaliar a compressão em áreas que estão temporariamente sob carga constante, ou seja, sem operação. É importante identificar se as maiores compressões em aterros sanitários ocorrem durante a operação ou a longo prazo por processos biodegradativos.

2 Modelos de Compressibilidade Empregados

2.1 Modelo de Sowers (1973)

Sowers (1973) foi o primeiro a formular um modelo para estimar recalques em aterros sanitários baseando-se na teoria da consolidação da mecânica dos solos (Pereira 2000). Esse modelo considera as parcelas de compressão inicial, primária e secundária. A compressão secundária está associada aos fenômenos de fluência e biodegradação e é expressa em termos de uma simples função logarítmica que relaciona o índice de compressão secundária (C_α) e o tempo. Embora o autor entenda que os recalques secundários em aterros ocorrem devido à processos de biodegradação, fluência e ravinamento, incorporam todos esses tipos de recalques em uma única função matemática, representada pela Equação 1.

$$S_s = C'_\alpha \cdot H_0 \cdot \log \frac{t_2}{t_1} \quad (1)$$

Onde: S_s = recalque secundário, (m); H_0 = espessura inicial da camada, (m); C'_α = coeficiente de compressão secundária; t_1 = tempo para conclusão da compressão primária (dias); t_2 = tempo de estimativa de recalque (dias).

2.2 Modelo de Gandola *et al.* (1994)

Baseando-se em resultados experimentais efetuados com lisímetros, Gandola *et al.* (1994) formularam um modelo exponencial para previsão de recalques não provocados por variação de cargas. Os autores fizeram uma interpolação analítica das medições efetuadas a fim de estabelecer uma função matemática para expressar as variações de recalques com o tempo, considerando como condição inicial recalque nulo e como condição final recalque tendendo a um valor assintótico.

Os autores observaram que os resultados das medições realizadas durante o experimento formam uma boa aproximação a uma lei exponencial decrescente, conforme mostra a Equação 2.

$$S = H_0 \cdot a \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

Onde: S = recalque (m); H_0 = altura inicial do aterro (m); a = constante de recalque unitário; k = constante de taxa de decomposição; t = tempo (meses).

2.3 Modelo de Meruelo (Palma, 1995)

Este modelo visa prever os recalques que ocorrem em um aterro a partir de uma formulação que incorpora e relaciona parâmetros fundamentais que determinam os processos de degradação biológica considerando apenas os recalques secundários. O modelo depende da perda de massa dos materiais degradáveis sob condições anaeróbicas, cujo principal fator limitante no processo de biodegradação é a taxa de hidrólise.

A previsão de recalques devido à perda de massa considerando o peso específico constante e que os processos de biodegradação provocam uma redução do volume do maciço de resíduos podendo ser expressa, para períodos posteriores à operação, pela Equação 3.

$$S = \frac{1}{k_h t_c} \cdot \alpha \cdot H_0 \cdot COD \left[(1 - e^{-K_h t_c}) \cdot (e^{-K_h t} - e^{-K_h t_0}) \right] \quad (3)$$

Onde: S = recalque (m); α = coeficiente de perda de massa; H_0 = altura inicial do aterro (m); COD = quantidade de matéria orgânica biodegradável dos RSU t = tempo pelo qual se deseja prever os recalques presente no resíduo por ano; k_h = coeficiente de hidrólise (dia^{-1}); t = tempo (dias); t_c = tempo de construção do aterro (dias); t_0 = idade do aterro no início das medições (dias).

2.4 Modelo de Ling *et al.* (1998)

Ling *et al.* (1998) propõem uma única equação para estimar recalques secundários, com o tempo inicial correspondente ao início de monitoramento dos recalques. Utilizam em sua formulação a magnitude do recalque final e taxa de recalque inicial como parâmetros-chave, (Equação 4).

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

Onde: S = recalque (m); ρ_0 = taxa inicial de recalque ($S/\Delta t$) para $t=t_0$ (dias); t = diferença entre o instante considerado e o início das medidas ($t = t_i - t_0$) (dias); S_{ult} = recalque último esperado (m). Os parâmetros ρ_0 e S_{ult} são determinados pela transformação da Equação 4, a partir de relações t/S versus t , por análise de regressão linear, conforme Equação 5.

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

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

2.5 Modelo de Oweis (2006)

O modelo avalia o recalque mecânico, de fluência e de decomposição de resíduos sólidos durante a operação do aterro e após o encerramento das atividades. Segundo Oweis (2006), durante o preenchimento das células o recalque mais pronunciado é o mecânico e, após o encerramento, o recalque promovido pela biodegradação. Neste trabalho apresenta-se somente as formulações para estimar os recalques pós-encerramento das atividades no aterro.

Assumindo que a operação do aterro acabe no tempo t_c , o autor sugere que o recalque por fluência seja calculado pela Equação 6.

$$\Delta S_s = 0,435 \cdot H \cdot C'_\alpha \cdot \ln \left(\frac{t}{t_c} \right) \quad (6)$$

Onde: ΔS_s = recalque por fluência (m); H = altura final da célula (m); C'_α = coeficiente compressão secundária; t = tempo pós-encerramento ($t \geq t_c$) (dias); t_c = tempo para completar o preenchimento da célula (dias).

Já os recalques dos resíduos por decomposição biológica após o encerramento das atividades no aterro podem ser estimados pela Equação 7.

$$Sd_{t \geq t_c} = \beta H \left[1 - \left(\frac{1}{t_c k} (1 - e^{-k t_c}) (1 - e^{-k'(t_{pc} - t_c)}) \right) \right] \quad (7)$$

Onde: $S_{dt \geq t_c}$ = recalque por decomposição em um tempo t maior ou igual a t_c ; β = fração de massa de resíduo que potencialmente pode ser convertida em gás; H = altura final da célula (m); k = constante de decaimento durante a operação; k' = constante de decaimento pós-encerramento; t_c = tempo para conclusão da operação do aterro; t_{pc} = tempo maior que t_c .

3 Materiais e Métodos

3.1 Área de Estudo

O Aterro Sanitário CTR-NI está localizado no município de Nova Iguaçu, no Estado do Rio de Janeiro, sudeste do Brasil. Trata-se de um aterro sanitário tipo vale que teve sua operação iniciada em 2003, sendo o primeiro aterro licenciado no estado do Rio de Janeiro e o primeiro no Brasil a ter um projeto de mitigação de gases de efeito estufa e geração de energia, bem como a comercialização de créditos de carbono. Com uma área de 120 hectares, o aterro é composto por 4 vales, no momento da realização desta pesquisa o aterro estava com os vales I, II e III parados e o Vale IV em operação. O aterro recebe diariamente entre 3.500 e 6.000 toneladas de resíduos sólidos. Na Figura 1 é apresentada uma visão aérea do aterro sanitário na época da pesquisa, com destaque em vermelho da área de estudo, localizada no Vale III. Essa área recebe resíduos sólidos urbanos e resíduos industriais classe II.



Figura 1 Visão espacial do aterro sanitário de Nova Iguaçu (CTR-NI) com destaque da área em estudo (Vale III).

3.2 Monitoramento dos Recalques

O monitoramento dos recalques no aterro consistiu na análise dos deslocamentos verticais e horizontais medidos em 8 marcos superficiais durante 960 dias (Klink, 2019). O Vale III operou durante o período de novembro de 2006 a fevereiro de 2014 e o monitoramento começou em janeiro de 2015, aproximadamente um ano após o encerramento das atividades no vale. A coleta de dados foi feita com a equipe técnica da empresa HAZTEC CTR de Nova Iguaçu. Na Figura 2 encontra-se a distribuição dos marcos superficiais no maciço do Vale III. Os valores iniciais de altura (H_0) foram determinados diminuindo o valor inicial da cota inicial do marco superficial e da cota de referência do Vale III. A leitura topográfica do período de acompanhamento seguiu a linha do tempo indicada na Tabela 1.

3.3 Calibração dos Modelos

A calibração dos modelos foi feita utilizando as medidas de recalques obtidas com o monitoramento a fim de obter os parâmetros necessários à aplicação de cada modelo matemático. Na Tabela 2 encontra-se um resumo dos parâmetros de cada modelo utilizado no presente trabalho e o método de cálculo aplicado.

A calibração do modelo de Sowers (1973) consistiu na utilização direta da Equação 1. H_0 foi considerado a altura inicial do aterro (H_0) registrada no início das medições menos a cota de fundo, o tempo inicial do processo de recalque secundário t_1 foi adotado como sendo 1 dia para validar matematicamente a equação, e t foi considerado o intervalo de tempo em dias decorrido entre a primeira e a última leitura topográfica de cada marco superficial.

No modelo de Gandola *et al.* (1994), os parâmetros constantes de recalque unitário (a) e constante de taxa de decomposição (k), foram determinados com o auxílio da ferramenta Solver do programa Microsoft Excel.

Para calibrar o modelo de Meruelo, adotou-se o valor de 0,50 para o COD como sugerido pela *United Nation Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC, 2011) para a fração do Carbono Orgânico Degradável dos resíduos que pode se decompor. O tempo de construção (t_c) foi considerado o tempo que o aterro operou (2650 dias), o t_0 foi considerado o tempo decorrido até o início do monitoramento (3015 dias) e t' foi considerado o tempo decorrido até o término do período de observação de cada MS (3945 dias). O coeficiente de hidrólise (k_h) e coeficiente de perda de massa (α) foram determinados através da ferramenta Solver do programa Microsoft Excel.

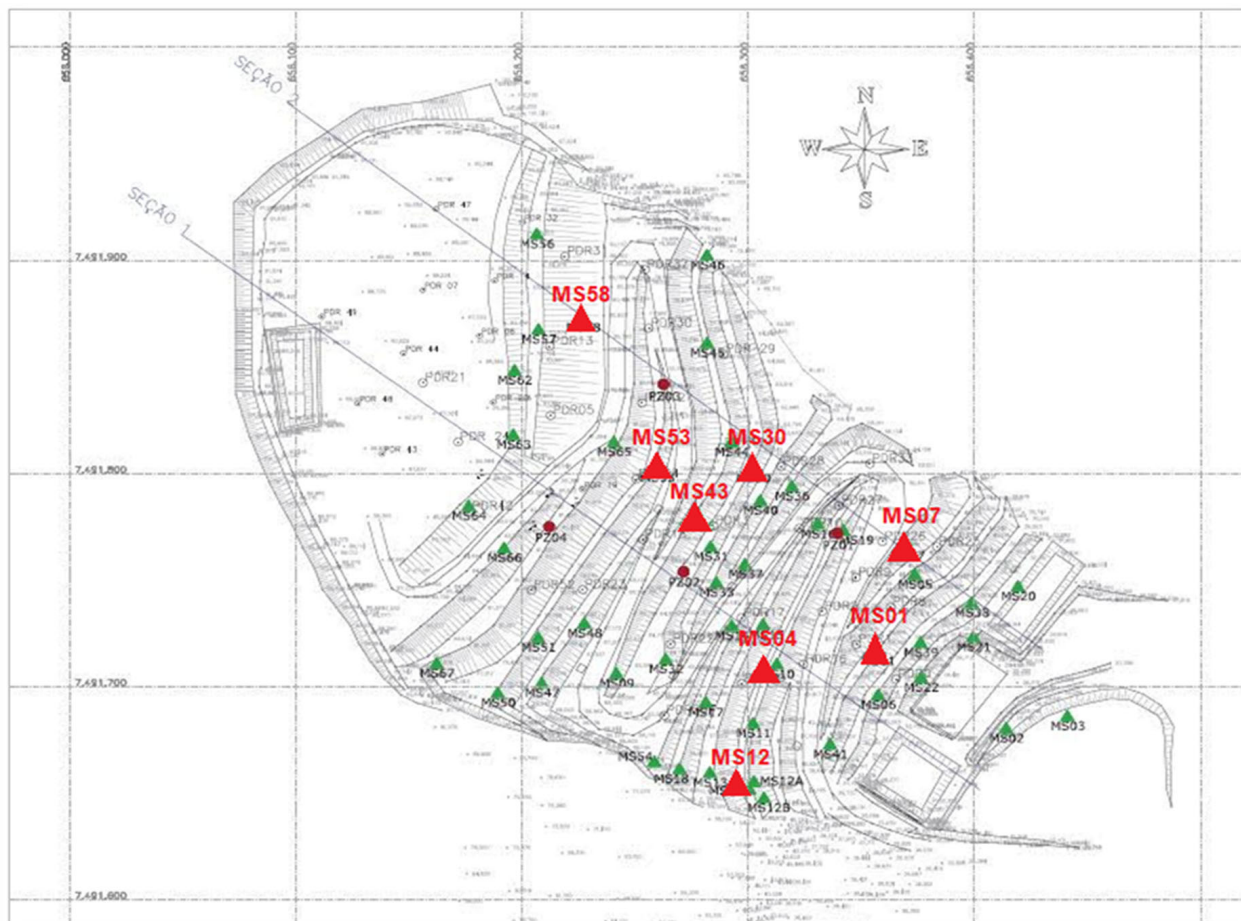


Figura 2 Distribuição espacial dos marcos superficiais no Vale III do aterro CTR NI.

Tabela 1 Resumo dos dados de monitoramento obtidos com os Marcos Superficiais.

Marcos	Início das leituras: 07/01/2015			Fim das leituras: 24/08/2017			
	N (m)	E (m)	H ₀ (m)	N (m)	E (m)	Desloc. Vert.(m)	Desloc. Horiz. (m)
MS01	7491624,84	656505,72	9,01	7491723,25	656356,58	0,117	0,018
MS04	7491777,81	656391,05	14,76	7491777,76	656390,96	0,130	0,000
MS07	7491772,93	656369,64	18,92	7491772,85	656369,62	0,135	0,000
MS12	7491662,09	656301,89	19,44	7491666,27	656282,43	0,103	0,002
MS30	7491809,20	656301,51	33,97	7491809,14	656301,47	0,143	0,000
MS43	7491786,78	656276,99	37,27	7491786,72	656276,97	0,212	0,000
MS53	7491809,42	656259,11	41,42	7491708,39	656208,05	0,180	0,011
MS58	7491880,02	656226,17	49,17	7491729,74	656206,55	0,230	0,015

Tabela 2 Parâmetros de cada modelo e método de cálculo aplicado.

Modelo	Parâmetros	Método
Sowers (1973)	$C'\alpha$	Aplicação direta da equação de Sowers
Gandola <i>et al.</i> (1994)	a, k	Solver do programa Microsoft Excel
Meruelo (Palma,1995)	COD, k_h, α	k_h, α - Solver do programa Microsoft Excel COD - adotado
Ling <i>et al.</i> (1998)	ρ_0, S_{ult}	Regressão linear
Oweis (2006)	$C'\alpha, k, k', \beta$	Solver do programa Microsoft Excel k - adotado

O modelo de Ling *et al.* (1998) foi calibrado a partir de uma análise de regressão linear onde os parâmetros de entrada foram t e S , que correspondem respectivamente ao tempo e valores de recalques medidos em cada marco superficial. Plotando-se curvas de dispersão t/S por t e gerando as equações da reta que melhor se ajustaram a essas curvas foi possível obter os valores de velocidade inicial, ρ_0 , e recalque final S_{ult} para cada MS.

A calibração do modelo de Oweis (2006) consistiu na utilização das Equações 6 e 7 que preveem o recalque após o encerramento das atividades do aterro devido aos

mecanismos de fluência (ΔS s) e decomposição biológica ($Sd_{t \geq t_c}$). Para o parâmetro k foi adotado o valor sugerido pela USEPA (1998), $k = 0,05$. Utilizou-se a ferramenta Solver estabelecendo-se os seguintes critérios: os parâmetros $C'\alpha$, k' e β como variáveis de decisão; como funções objetivos foram utilizadas as Equações 6 e 7 e aplicou-se a restrição de $C'\alpha \geq 0,01$, $k' \leq k$ e $\beta \geq 0,001$.

Com os parâmetros obtidos com a calibração foi possível representar o comportamento das curvas de recalques para um período de 50 anos. Os gráficos estão apresentados nas Figuras 3 e 4.

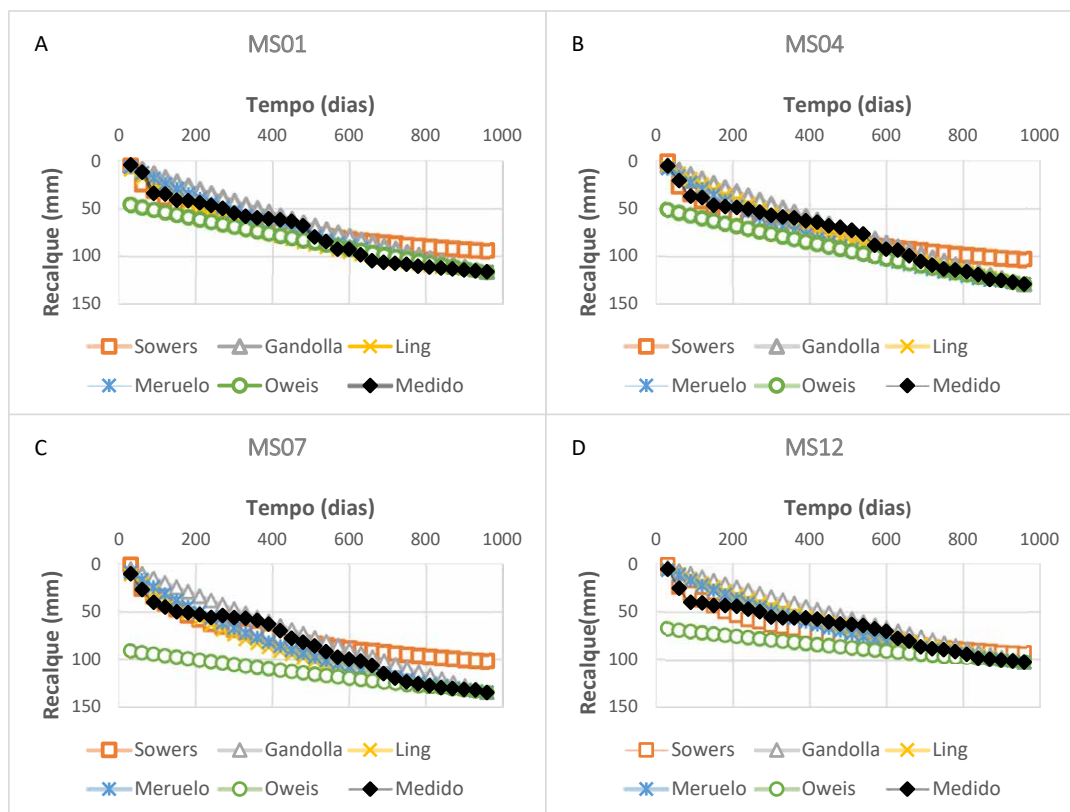


Figura 3 Calibração dos modelos de Sowers (1973), Gandola *et al* (1994), Meruelo (Palma,1995), Ling *et al.* (1998) e Oweis (2006). A. MS01; B. MS04; C. MS07; D. MS12.

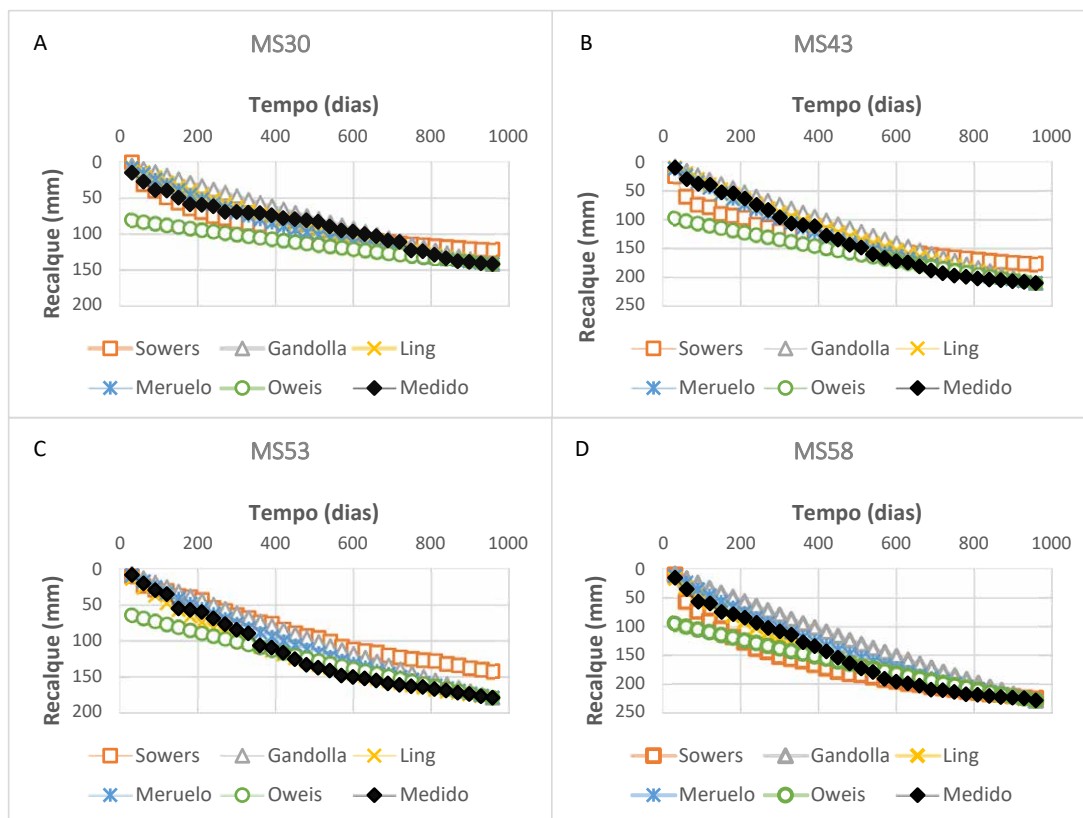


Figura 4 Calibração dos modelos de Sowers (1973), Gandolla *et al* (1994), Meruelo (Palma, 1995), Ling *et al.* (1998) e Oweis (2006). A. MS30, B. MS43, C. MS53 e D. MS58.

4 Resultados e Discussões

4.1 Monitoramento dos Recalques

A Tabela 3 apresenta os resultados dos valores medidos em campo para cada MS. É importante observar que os recalques foram medidos entre 2015 e 2017 e o Vale III foi fechado em 2014, portanto esses recalques devem-se exclusivamente aos processos de compressão secundária.

As Figuras 5A e 5B mostram respectivamente as curvas de deslocamentos verticais e horizontais medidos em função do tempo de monitoramento, 960 dias.

Os 8 marcos superficiais apontam valores de recalques variando entre 103 mm e 230 mm, correspondendo a deformações com intervalo de 0,48% a 1,30%. Já os deslocamentos horizontais variaram entre 0 e 18 mm. Os resultados mostraram que sob carga constante foram pouco significativos. Resultados semelhantes, em termos de deformações sobre carga constante, foram observados no vazadouro de Marambaia, como relatado nos trabalhos de Correia (2017) e van Elk *et al.* (2019), bem como no aterro

controlado de Valdemingómez, na Espanha, apresentado no estudo de van Elk *et al.* (2014). Os autores apresentaram valores de recalques obtidos de marcos superficiais durante um período de 8 anos, com deformações na faixa de 0,16 a 0,41%. Neste caso os recalques começaram a ser medidos após 5 anos de encerrado as atividades. Observa-se que nem sempre deformações de baixa magnitude são relatadas na literatura técnica, por exemplo, Giorgini *et al.* (2019) obtiveram medidas de deformações variando entre 36% e 48% da altura inicial durante um período de 13 anos em uma célula experimental no aterro de Belo Horizonte. Porém, nesse caso é importante ressaltar que a célula tinha apenas 3,8 metros de altura, com forte possibilidade de entrada de ar, o que propicia velocidades de recalques maiores. Qian *et al* (2002) afirmam que o recalque total pode atingir de 20 a 30% da altura inicial do aterro. Elagroud *et al.* (2008) comentam da dificuldade de quantificar e diferenciar a influência da biodegradação no recalque total. Oweis (2006) comenta que as reações bioquímicas que ocorrem nos aterros fazem com que os recalques em resíduos sejam bastante complexos.

Tabela 3 Resumo dos deslocamentos e deformações para os 8 MS.

Início das leituras: 07/01/2015			Fim das leituras: 24/08/2017		
Marcos	Frequência das leituras	H ₀ (m)	Desloc. Vertical (m)	Desloc. Horiz. (m)	Deformação vertical (%)
MS01	mensal	9,01	0,117	0,018	1,30
MS04	mensal	10,09	0,130	0,002	1,08
MS07	mensal	18,92	0,135	0,001	0,71
MS12	mensal	19,44	0,103	0,002	0,78
MS30	mensal	33,97	0,143	0,001	0,48
MS43	mensal	37,27	0,212	0,001	0,78
MS53	mensal	41,42	0,180	0,011	1,14
MS58	mensal	49,17	0,230	0,015	0,65

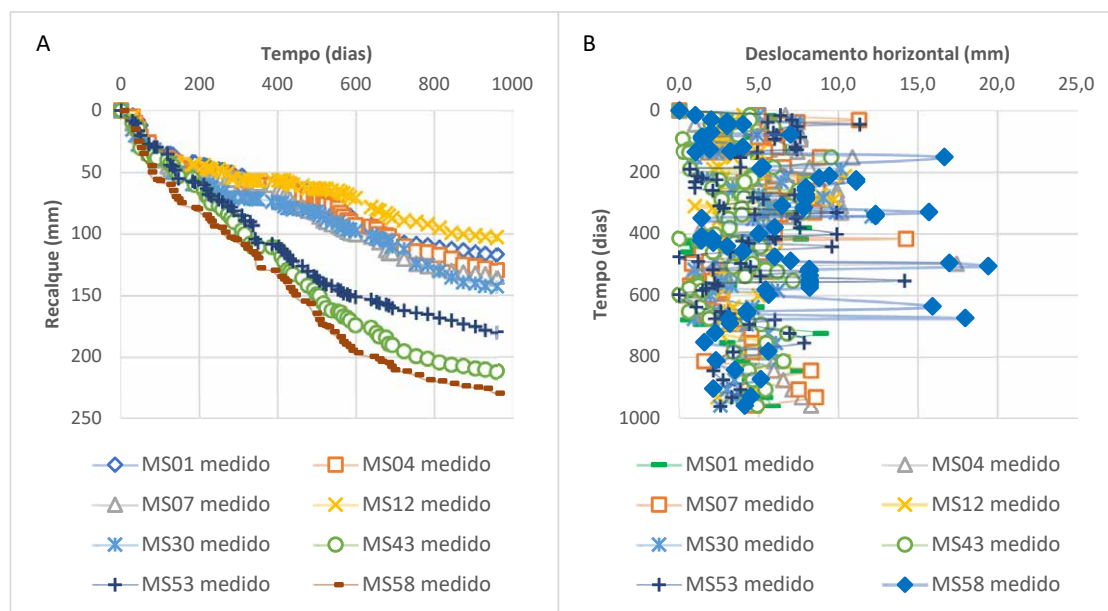


Figura 5 A. Deslocamentos verticais; B. Deslocamentos horizontais.

4.2 Previsão de Recalque

Com base nos parâmetros obtidos pela calibração dos modelos foi realizada uma previsão de recalques para um período de 50 anos após o início do monitoramento. Os parâmetros obtidos de cada modelo encontram-se na Tabela 4. Nas Figura 6 e 7 são apresentadas as previsões de recalques obtidas com os cinco modelos empregados.

Os gráficos de calibração apresentados nas Figuras 3 e 4 mostram que os resultados obtidos através dos modelos utilizados se ajustaram relativamente bem aos resultados de campo, principalmente os modelos de Gandola *et al.* (1994) e Ling *et al.* (1998). No entanto, as curvas obtidas com a previsão de recalques, Figuras 6 e 7, mostram que a longo prazo os modelos apresentam comportamentos diferentes. Na Tabela 5 encontra-se uma faixa de valores

de previsão de recalques encontrados por meio dos modelos matemáticos.

Os modelos de Ling *et al.* (1998), Meruelo (1995) e Sowers (1973) apresentam resultados mais aproximados, enquanto os modelos de Oweis (2006) e Gandola *et al.* (1994) apresentam valores mais elevados de previsão de recalques quando comparados com Ling *et al.* (1998), Meruelo (1995) e Sowers (1973).

O modelo de Gandola *et al.* (1994) prevê uma estabilização de recalques mais tardia, a partir de 10.000 mil dias, já o modelo de Oweis (2006) mostra uma tendência de aumento dos recalques com o tempo, mesmo em um prazo longo, de 50 anos. Ambos modelos consideram uma taxa de decaimento constante o que resulta em uma superestimação dos valores de recalques. Valores elevados estimados pelo modelo de Oweis (2006) foram obtidos também por van Elk *et al.* (2019) para o aterro controlado de Marambaia.

Tabela 4 Resumos dos parâmetros encontrados para cada modelo matemático utilizado.

MS	Sowers (1973)	Gandolla et al. (1994)		Meruelo (Palma,1995)			Ling et al. (1998)		Oweis (2006)			
	C'_a	a	K	COD	kh (dia ⁻¹)	α	ρ_o (mm/dia)	S_{ult} (mm)	C'_a	K	k'	β
1	0,004	0,038	0,013	0,50	0,0013	0,20	0,32	189	0,07	0,05	0,004	0,0010
4	0,004	0,051	0,009	0,50	0,0016	0,25	0,22	345	0,07	0,05	0,022	0,0010
7	0,002	0,033	0,008	0,50	0,0017	0,15	0,37	217	0,02	0,05	0,003	0,0036
12	0,002	0,029	0,006	0,50	0,0015	0,09	0,18	256	0,02	0,05	0,003	0,0025
30	0,001	0,024	0,006	0,50	0,0016	0,08	0,25	345	0,02	0,05	0,011	0,0015
43	0,002	0,021	0,010	0,50	0,0014	0,10	0,50	380	0,03	0,05	0,002	0,0010
53	0,001	0,019	0,008	0,50	0,0010	0,06	0,47	300	0,02	0,05	0,004	0,0001
58	0,002	0,018	0,009	0,50	0,0012	0,07	0,56	400	0,02	0,05	0,001	0,0005

Tabela 5 Faixa de valores de recalques para cada modelo matemático.

Recalques previstos/Modelos	Sowers (1973)	Meruelo (1995)	Ling et al.(1998)	Gandolla et al (1994)	Oweis (2006)
Recalque Mínimo (mm)	147	135	183	342	328
Recalque Máximo (mm)	329	336	385	905	1085

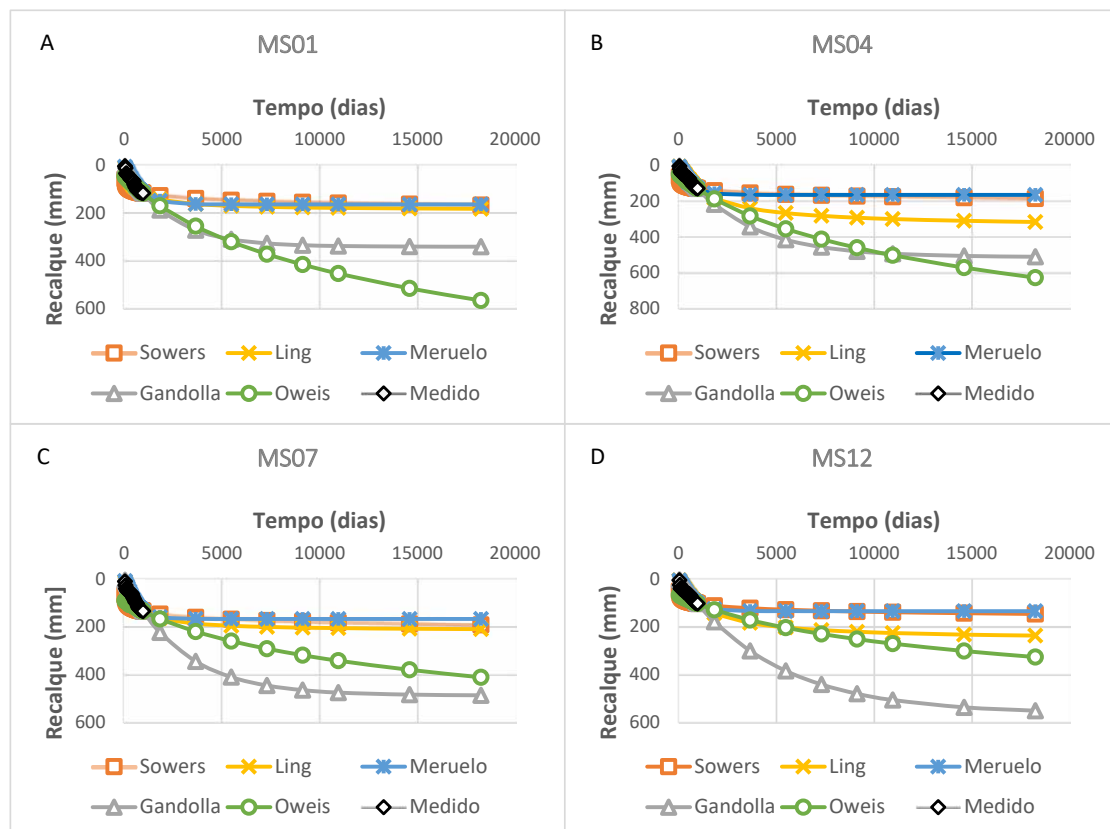


Figura 6 Previsão dos modelos para o MS01 (a); Previsão dos modelos para o MS04 (b); Previsão dos modelos para o MS07 (c); Previsão dos modelos para o MS12 (d).

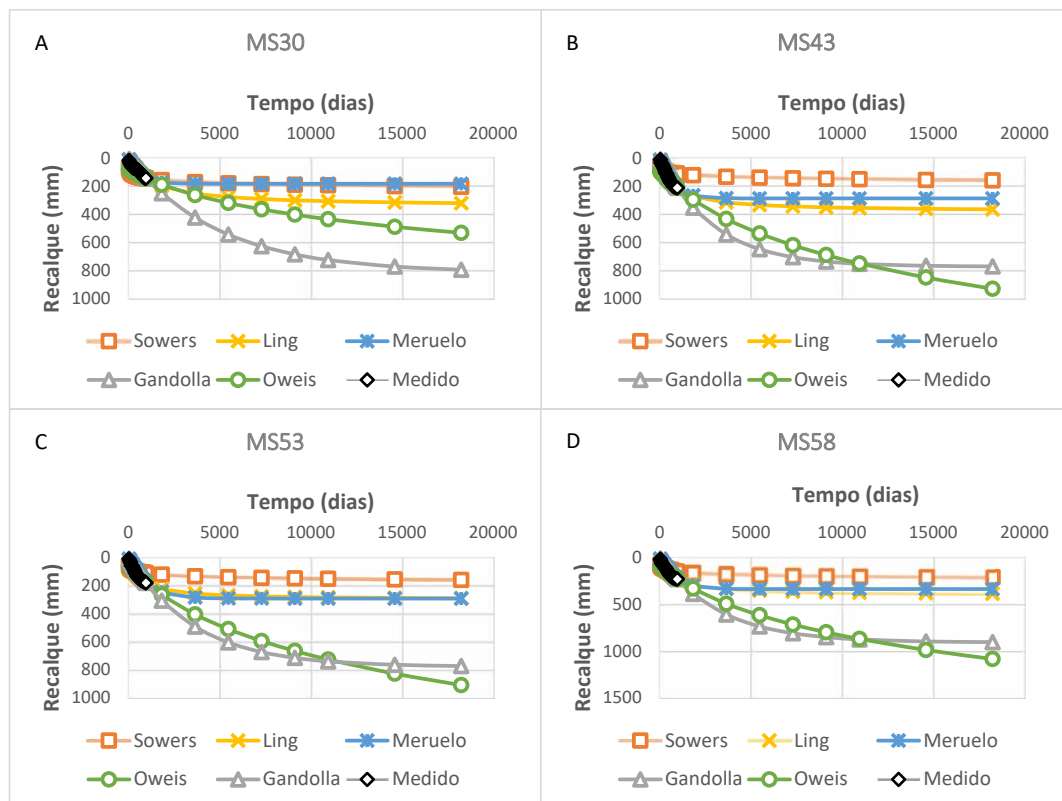


Figura 7 Previsão dos modelos para o MS30 (A); Previsão dos modelos para o MS43 (B); Previsão dos modelos para o MS53 (C); Previsão dos modelos para o MS58 (D).

McDougall (2011) e Babu *et al.* (2010) comentam que a escolha do modelo tem uma influência significativa na previsão de recalques. Babu *et al.* (2010) destacam que a acurácia de um modelo de previsão de recalques pode ser mais bem estabelecida em aterros onde tem sido implementado um programa extensivo de monitoramento. Ademais, na ausência de dados de campo, é útil comparar previsão de modelos propostos com previsão de modelos já estabelecidos e validados com medidas de campo.

5 Conclusões

Este trabalho apresenta resultados de recalques obtidos de um monitoramento no Vale III do aterro de Nova Iguaçu através de marcos superficiais durante um período de 930 dias, realizando uma análise da compressibilidade em longo prazo à luz de cinco modelos matemáticos: Sowers (1973), Gandola *et al.* (1994), Meruelo (Palma, 1995), Ling *et al.* (1998) e Oweis (2006).

Os recalques medidos durante o período de observação variaram na faixa entre 103 mm e 230 mm, correspondendo a deformações com intervalo de 0,48% a 1,30%. Já os deslocamentos horizontais variaram entre 0 e 18 mm. Portanto, trata-se de deslocamentos pouco

significativos, que não comprometem a estabilidade do maciço. Destacando-se que sob carga constante os recalques apresentaram baixa magnitude.

Os modelos de previsão apresentaram curvas de recalques que se ajustaram relativamente bem a curto prazo, como observadas nos gráficos de calibração, já a longo prazo destacam-se as previsões de Gandola *et al.* (1994) e Oweis (2006) que apresentam valores maiores que os modelos de Sowers (1973), Ling *et al.* (1998) e Meruelo (1995). Os modelos Gandola *et al.* (1994) e Oweis (2006) consideram uma taxa de decomposição constante ao longo do tempo e isto pode influenciar o aumento dos valores de recalques a longo prazo quando comparados aos demais modelos analisados neste trabalho. Os modelos de Sowers (1973) e Ling *et al.* (1998) incorporam os recalques mecânicos e por biodegradação em funções logarítmica e exponencial que dependem do tempo. Apesar de simples, as respostas são positivas e podem ser usados para prever recalques, já que foram extensivamente validados com dados de campo em vários estudos científicos. O modelo Meruelo leva em consideração os recalques por biodegradação, expresso por uma função cinética de primeira ordem que agrega um parâmetro de biodegradação, o COD, facilitando a previsão de recalques para aterros novos. Esse modelo também se

mostrou apto e simples para a previsão de recalques. Oweis (2006) apresenta dados superestimados na previsão de recalques e não se ajustou tão bem na calibração, portanto é um modelo que deve ser usado com bastante cautela. O tempo de monitoramento também interfere na previsão das magnitudes de recalques; na prática um parâmetro dificilmente se manterá constante por longo período, como preconiza Gandola *et al.* (1994) e Oweis (2006). Os valores de previsão de recalques em 50 anos com os modelos utilizados nesta análise variaram entre 150mm e 1000 mm aproximadamente. Sendo mais significativos as previsões obtidas através do modelo de Oweis (2006).

Finalmente, é possível concluir que cada modelo matemático possui diferentes parâmetros e, portanto, diferentes tipos de limitações, sugerindo que a previsão de recalque a longo prazo em aterros de resíduos sólidos urbanos deve utilizar mais de um modelo para permitir uma análise comparativa e mais confiável. No caso específico deste aterro sanitário pode-se indicar como modelos de previsão de recalques para uma análise da compressibilidade dos resíduos os modelos de Sowers (1973), Meruelo (1995) e Ling *et al.* (1998).

6 Referências

- Babu, S.L.G.; Reddy, K.R.; Chouskey, S.K. & Kulkarni, H.S. 2010. Prediction of Long-Term Municipal Solid Waste Landfill Settlement Using Constitutive Model. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 14(2): 139-150.
- Correa, L.R. 2017. *Análise de Recalques a Longo Prazo no Antigo Vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu – RJ*. Programa de Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 100p.
- Elagroudy, S.A.; Abdel-Razik, M.H.; Warith, M.A.; Ghobrial, F.H. 2008. Waste Settlement in Bioreactor Landfill Models. *Waste Management*, v. 28, p. 2366-2394.
- Edil, T. B.; Ranguete, V.J. & Wuellner, W. 1990. Settlement of Municipal Refuse. In: Landva, a. & Knowles, D. (eds). *Geotechnics of Waste Fills: Theory and Practice*. ASTM STP 1070, p. 225-239.
- Gandola, M.; Dugnani, L.; Bressi g.; Acaia, C. 1994. A determinação dos efeitos do recalque sobre os depósitos de lixo sólido municipal. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE DESTINAÇÃO DE LIXO, Salvador, 1994. p. 191-211.
- Giorgini, M.G.; Simoes, G.F. & Catapreta, C.A.A. 2019. Comparação entre Previsões por Modelos e Registros de Monitoramento de Recalques de Longo Prazo de um Aterro Sanitário Experimental. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL (REGEO 2019) VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOSINTÉTICOS, São Carlos, 2019. p.787-794.
- Klink, A. F. C. 2019. *Previsão de Recalques em Aterros Sanitários Utilizando Modelos de Compressibilidade: Estudo de Caso da Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu-RJ*. Programa de Mestrado em Engenharia Ambiental, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 101p.
- 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.
- McDougall, J. 2011. Settlements: The Long and the Short of it. *Geotechnical Special Publication*. Geotechnical Characterization, Field Measurement and Laboratory Testing of Municipal Solid Waste, ASCE Geotechnical Special Publication. 209: 76-111.
- Oweis, I. S. 2006. Estimate of Landfill Settlements Due to Mechanical and Decompositional Processes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(5): 644-650.
- Palma, J. H. 1995. *Comportamiento Geotécnico de Vertederos Controlados de Resíduos Sólidos Urbanos*. Programa de Doutorado em Geotecnia, Universidade de Cantabria, Santander, Espanha Tese de Doutorado, 270 p.
- Pereira, A.G.H. 2000. *Compressibilidad de los Resíduos Sólidos Urbanos*. Departamento de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo, Tesis Doctoral, 281 p.
- Qian, X.; Koerner, R.M. & Gray, D.H. 2002. *Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction*. Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A, Chapter 15, p. 576–602.
- Sagaseta, C. 1995. General Report. Waste Disposal by Landfill-Green, 1993. Ed. Sarsby, Balkena Rotterdam, ISBN 90.
- Sowers, G. F. 1973. Settlement of waste disposal fills. In: EIGHTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. Moscow, (2): 207-210.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1998. User's manual landfill gas emissions: Model version 2.0. EPA/600/R-98-054, Research Triangle Park, N.C.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2011. *Methodological tool: Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site*. Relatório técnico. 9 p.
- van Elk, A.G.H.P.; Mañas, L.S. & Boscov, M.E.G. 2014. Field survey of compressibility of municipal solid waste. *Soils and Rocks*, São Paulo, 37 (1): 85-95p.
- van Elk, A.G.H.P.; Correia, L.R. & Ritter, E. 2019. Análise dos recalques em longo prazo no vazadouro de Marambaia. *Revista da Engenharia Sanitária*. 24(3): 547 -557.

Recebido em: 04/12/2019

Aprovado em: 18/11/2020

How to cite:

Klink, A.F.C.; Elk, A.G.H.P.; & Silva, J.C. 2021. Aplicação de Modelos Matemáticos para Previsão de Recalques do Aterro de Nova Iguaçu – RJ, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 44: 37103. DOI 1982-3908_2021_44_37103