

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/376

Atualização Bayesiana Aplicada à Estimativa de Recalques de um Aterro Sanitário

Thiago Souza Ornelas Moraes

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, São Gonçalo, Brasil, thi_ornelas@hotmail.com

Bernadete Ragoni Danziger

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, brdanzig@uerj.br

Alessandra Conde de Freitas

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, alessandracfreitas@poli.ufrj.br

RESUMO: A previsão de recalques em aterros sanitários consiste num grande desafio. Estudos e pesquisas têm sido desenvolvidos para aperfeiçoar essa estimativa, com base em métodos teóricos e empíricos. No entanto, a heterogeneidade do maciço dificulta a ampla aplicação das formulações desenvolvidas e torna a tarefa árdua. O artigo pretende contribuir para a redução das incertezas de tais estimativas, por meio da aplicação da atualização bayesiana ao caso de um aterro sanitário de uma Central de Tratamento de Resíduos em Pernambuco. Utilizou-se dois modelos de previsão de recalques: Sowers (1973) e o Simplificado de Yen e Scanlon (1975). Os modelos são utilizados nas estimativas *a priori*. O uso de dois modelos objetivou comparar suas acurácias, sendo mais adequado àquele com estimativa atualizada mais próxima do valor experimental e menor incerteza na previsão. Combinadas as estimativas *a priori* com dados do monitoramento de 30 marcos superficiais de recalques, como função de *verossimilhança*, procedeu-se à atualização. A estimativa *a posteriori* foi realizada nos moldes da proposta de Lacasse (1991) no controle de execução de estacas offshore. A partir de conceitos estatísticos da Teoria de Bayes, muito útil a várias aplicações da Geotecnia, é possível atualizar a probabilidade de ocorrência de um evento “A” considerando que um evento “B” ocorreu. O conceito de Indicador de Falha “D” (GUTTORMSEN, 1987) foi aplicado na avaliação. A aplicação indicou a redução das incertezas e permitiu a comparação dos dois modelos de previsão *a priori*.

PALAVRAS-CHAVE: Previsão de Recalque. Teoria Bayesiana. Aterro Sanitário. Resíduos Sólidos Urbanos.

ABSTRACT: Settlement predictions for solid waste landfills are a major challenge. Many studies and research have been developed to improve this estimate, based on theoretical and empirical methods. The heterogeneity of this material prevents a wide application of the settlement formulations and turns the estimates into an arduous task. The article aims to contribute to the reduction of the uncertainties of the estimates through the application of the Bayesian update to the case of a landfill of a Waste Treatment Plant, in Pernambuco, using two settlement prediction models: Sowers (1973) and the Simplified one by Yen and Scanlon (1975). Both models are used in *a priori* estimates. The two different models aimed to verify the one that allows a more accurate estimate, with a mean value closer to the measured one and presenting less uncertainty. These *a priori* estimates were combined with settlement monitoring data from 30 surface landmarks, as a likelihood function, and the update was carried out. The updating was based Lacasse's (1991) proposal for the execution control of offshore piles. From the statistical concepts of Bayes' Theory, useful for various Geotechnical applications, it is possible to calculate the probability of occurrence of an event "A" considering that an event "B" occurred. The concept of the Failure Indicator from Guttormsen, 1987 evaluates the quality of the updating. The application indicated the reduction of uncertainties and allowed the comparison of two *a priori* models.

KEYWORDS: Settlement prediction. Bayesian Theory. Landfill. Urban solid waste.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da indústria e dos bens de consumo levaram ao aumento mundial da geração de resíduos, ocasionando uma grande degradação do meio ambiente. A reciclagem, compostagem e incineração são algumas alternativas para eliminar o crescimento do acúmulo de resíduos. Ainda assim, restos acabam sendo descartados. Em razão da crescente preocupação com o meio ambiente, busca-se melhor planejamento

na sua destinação em locais adequados, baseado na Política Nacional de Resíduos Sólidos (lei 12.305-BRASIL, 2010), dentre eles os Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (ARSU). Esta estrutura passou se popularizou no Brasil na década de 90, com o Aterro Sanitário de Bandeirantes (SP). Nos últimos anos, a concentração urbana e restrições ambientais têm limitado a viabilização de novas unidades. Um fator que se apresenta relevante é o aumento da vida útil e aproveitamento da capacidade disponível de unidades existentes.

A eficiência e os cuidados com disposição do RSU constituem num grande esforço. Assim, é essencial conhecer os mecanismos que atuam sobre os maciços desse tipo, bem como os parâmetros que os caracterizam. Problemas envolvendo a deformabilidade de aterros sanitários, por exemplo, são recorrentes e devido à sua característica complexa, vêm sendo amplamente abordados nos meios especializados.

A magnitude e a variação do tempo de duração dos recalques em ARSU impõem-se como um grande desafio para profissionais do setor. Diversos estudos e pesquisas têm sido desenvolvidos a fim de reduzir a incerteza das previsões de recalques realizados com base em métodos teóricos ou empíricos, que diversas vezes se distanciam da realidade encontrada na fase de operação dos empreendimentos. Dessa forma, o enfoque probabilístico do Teorema de Bayes se apresenta como uma alternativa interessante, contemplando estimativas de recalque por métodos teóricos ou empíricos, *a priori*, com os dados obtidos de instrumentos de monitoramento, *funções de verossimilhança*, e obtenção de estimativas atualizadas, estimativas *a posteriori*.

A partir do uso dessa metodologia combinada é possível analisar comparativamente as estimativas realizadas na fase de projeto com os dados aferidos na operação do aterro, e dessa forma, além de atualizar estratégias, investimentos e ações necessárias ao longo da vida útil da unidade, é possível rever parâmetros utilizados nas estimativas de recalques, afim de torná-las mais realistas com diminuição de incertezas.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

2.1 Localização

A Unidade está localizada no Município de Jaboatão dos Guararapes-PE, região metropolitana do Recife. Com formato aproximado de um retângulo, o empreendimento possui cerca de 178.000m² de área. A Figura 1 apresenta o mapa de localização e as principais referências do entorno, dentre as quais se destacam 7km a oeste das praias da região, 5km a noroeste da Lagoa Olho d'Água e 200m a oeste do Rio Jaboatão.



Figura 1 – Localização da Unidade 01 (Fonte: adaptada de Google Earth).

2.2 Breve histórico

A primeira célula de disposição do aterro sanitário teve foi iniciada em 2007 e recebeu cerca de 10.000.000 tf de resíduos até março de 2019. As escavações para a implantação da segunda célula iniciaram-se no final de 2014 e sua disposição em novembro de 2015, recebendo cerca de 3.300.000 tf de resíduo até o terceiro mês de 2019. A partir desse momento a unidade passou pelo processo de unificação e sobreposição.

No geral, o maciço apresenta taludes bem definidos, com declividades de cerca de 2H:1V cobertos com solo e gramíneas. Verifica-se a implantação de geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) como parte do sistema de impermeabilização de fundo, além de dispositivos de drenagem pluvial em suas faces.

O espalhamento e compactação dos resíduos é feito por trator de esteiras, espalhando e compactando o material em finas camadas, dando cerca de cinco passadas sobre cada uma delas. O processo é repetido até a formação dos chamados alteamentos, que nessa unidade chegam a cerca de 6m de altura, e são intercalados por bermas de equilíbrio de 5m de largura. Ao atingir a altura desejada, o aterro é coberto com uma camada

de cerca de 0,50m de solo de jazida local. Na superfície são instalados instrumentos de monitoramento, marcos superficiais, para acompanhamentos periódicos dos deslocamentos verticais e horizontais do maciço.

2.3 Seleção de instrumentos analisados

A fim de realizar a atualização da estimativa de recalque para a unidade, foram identificados 30 marcos superficiais posicionados ao longo do maciço, com histórico de recalque disponível, permitindo a realização da Análise Bayesiana pela aplicação de modelos teóricos na estimativa *a priori* e posterior atualização. Três regiões foram estudadas, como resume a Tabela 1.

Tabela 1 – Período de monitoramento dos Marcos Superficiais analisados em cada região.

LOCAL	MS	IMPLANTAÇÃO	MONITORAMENTO
SUDESTE	01 a 08	Mar./2018	Out./2019 a Out./2021
SUDOESTE	09 a 11	Mar./2018	Out./2019 a Out./2021
	12 a 15	Nov./2020	Abr./2021 a Abr./2023
NORTE	16 a 19	Nov./2020	Abr./2021 a Abr./2023
	20 a 30	Dez./2019	Out./2020 a Out./2022

Fonte: Arquivo do autor.

3 MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUE

A seguir são apresentados os principais modelos de estimativa dos recalques e conceitos utilizados no estudo.

3.1 Modelo de Sowers (1973)

Trata-se de modelo baseado na teoria clássica de adensamento de Terzaghi da mecânica dos solos para RSU. Os recalques primários, relacionados aos incrementos de carregamento, ocorrem de forma rápida, neste caso, em menos de 1 mês, sendo desconsiderados nesse estudo. Quanto aos recalques de longo prazo, que incluem os fenômenos de fluência e biodegradação, o modelo admite a linearidade da relação recalque vs. logaritmo do tempo. Os recalques secundários (ΔH_2) podem ser obtidos a partir da seguinte equação:

$$\Delta H_2 = H_0 \cdot C'\alpha \cdot \log(t_f / t_i) \quad (1)$$

onde: ΔH_2 = recalque secundário; H_0 = espessura inicial da camada; $C'\alpha$ = coeficiente de compressão secundária; t_f = tempo final da análise; t_i = tempo inicial da análise, ou seja, final do recalque primário.

Para fins de cálculo, foi adotado o coeficiente de compressão secundária obtido em cada um dos instrumentos estudados como forma de calibração do modelo, bem como para o início do monitoramento foi adotado o momento t_i . A altura da coluna dos resíduos foi obtida a partir das cotas do fundo do aterro e das cotas nos MS no início do monitoramento.

3.2 Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975)

Este modelo foi desenvolvido de forma empírica, a partir do monitoramento de três aterros sanitários da Califórnia (EUA) por um período de 9 anos, onde foi observado que a taxa de recalques decresce linearmente com o logaritmo do tempo. Esse modelo aplica-se somente aos recalques secundários, objeto de interesse desse estudo, e utiliza os parâmetros m (taxa de recalques) e t_1 (idade média do aterro), obtidos pelas equações:

$$m = \Delta H / \Delta t \quad (2)$$

$$t_1 = t - t_c / 2 \quad (3)$$

onde: m = taxa de recalque; ΔH = recalque; Δt = intervalo de tempo entre leituras; t = tempo de início da construção; t_c = tempo de construção do aterro; t_1 = idade média do aterro.

Analisando a aplicação dos estudos apresentados, Ling *et al.* (1998) propuseram o emprego de uma função logarítmica simplificada para reproduzir as curvas de recalque a partir da equação (3), admitindo como tempo inicial (t_0) o tempo correspondente ao início das medidas de recalque, apresentando o recalque como:

$$\Delta H = a' - b' \cdot \log t \quad (4)$$

Como forma de calibrar o modelo, as constantes a' e b' foram adotadas conforme registro de cada instrumento monitorado na unidade estudada. O tempo de início do monitoramento, a exemplo da aplicação no Modelo de Sowers, foi adotado como t_0 . A altura da coluna dos resíduos foi obtida a partir das cotas do fundo do aterro e das cotas nos marcos no início do monitoramento.

4 TEOREMA DE BAYES

Este teorema descreve um conceito fundamental da teoria da probabilidade e da estatística. Trata-se de um método para estimativas de probabilidades condicionais, ou seja, a probabilidade de um evento ocorrer, dado que outro evento já ocorreu. Dessa forma, a incerteza do parâmetro é modelada por distribuição *a priori* e *a posteriori*. A distribuição *a posteriori* é calculada com a atualização da distribuição *a priori*, utilizando uma função de máxima verossimilhança, que contém a observação obtida de dados disponíveis, Figura 2.

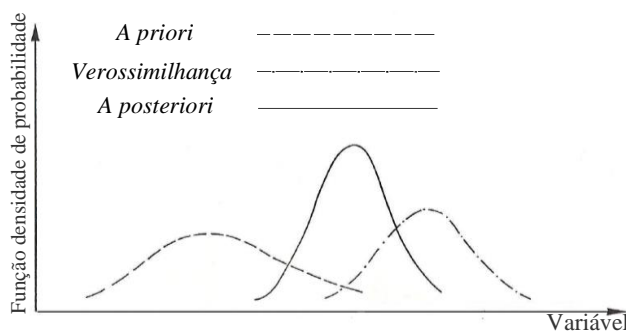


Figura 2 – Distribuições *a priori*, função de verossimilhança e *a posteriori* (adaptado de CABRAL, 2008).

Lacasse *et al.* (1991), ponderando que a previsão do comportamento das fundações de uma estrutura não pode ser feita com exatidão face às variações espaciais das propriedades dos materiais, deficiências nas investigações geotécnicas, restrição dos modelos de cálculo, incertezas nos parâmetros adotados e nas cargas atuantes, e tendo por base o Teorema de Bayes, desenvolveram equações considerando o comportamento normal para as distribuições conjugadas, que permitem a estimativa do valor esperado e da variância atualizada (*a posteriori*), em função do valor esperado e da variância da estimativa *a priori* e da de verossimilhança.

$$\mu_Q = (\sigma_Q^{2L} \cdot \mu_Q^P + \sigma_Q^{2P} \cdot \mu_Q^L) / (\sigma_Q^{2L} + \sigma_Q^{2P}) \quad (5)$$

$$\sigma_Q^2 = (\sigma_Q^{2L} \cdot \sigma_Q^{2P}) / (\sigma_Q^{2L} + \sigma_Q^{2P}) \quad (6)$$

onde: μ_Q = valor atualizado, *a posteriori*; μ_Q^P = valor *a priori*; μ_Q^L = valor da função de verossimilhança; σ_Q^{2L} , σ_Q^{2P} , σ_Q^2 = variância da distribuição de verossimilhança *a priori* e *a posteriori*, respectivamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As equações 5 e 6 possibilitam combinar os valores estimados de recalque obtidos de modelos semiempíricos (item 3), assumidos como a distribuição *a priori*, enquanto os dados de monitoramento mensal dos marcos superficiais da unidade foram considerados como a distribuição da função de verossimilhança. Como os marcos superficiais monitorados exibem comportamentos distintos nos trechos do maciço, resultado da sequência histórica de disposição e ações ocorridas, optou-se por realizar essas atualizações separadamente para cada uma das regiões: Sudeste, Sudoeste e Norte, além do grupamento total do banco de dados.

5.1 Atualização do estudo de caso para o Modelo de Sowers (1973)

A Tabela 2 resume os parâmetros obtidos, valores de estimativas de recalque, para a aplicação do Teorema de Bayes no período de 360 e 720 dias.

Pode-se observar em ambos cenários avaliados, 360 e 720 dias, que as estimativas obtidas *a priori* pelo Modelo de Sowers se apresentam sempre superiores aos medidos em campo, ou seja, conservativas. Reunindo todos os dados, o grau de conservadorismo é de, respectivamente 49% e 13% superiores, nestes períodos.

Tabela 2 – Parâmetros da distribuição *a posteriori* do recalque a partir do Modelo de Sowers (1973).

PERÍODO	SETOR	PARCELA	MÉDIA	D. PADRÃO	VARIÂNCIA	A POSTERIORI			
			μ (m)	σ (m)	σ^2 (m ²)	μ (m)	σ (m)	σ^2 (m ²)	
360 dias	TODOS	<i>A priori</i>	0,91	0,52	0,27	0,73	0,33	0,11	
		<i>Verossimilhança</i>	0,61	0,43	0,18				
	SE	<i>A priori</i>	0,63	0,18	0,03	0,47	0,12	0,01	
		<i>Verossimilhança</i>	0,35	0,15	0,02				
	SO	<i>A priori</i>	0,74	0,64	0,41	0,56	0,35	0,12	
		<i>Verossimilhança</i>	0,48	0,42	0,17				
	N	<i>A priori</i>	1,14	0,51	0,26	0,96	0,33	0,11	
		<i>Verossimilhança</i>	0,81	0,44	0,20				
	720 dias	TODOS	<i>A priori</i>	1,07	0,61	0,37	0,99	0,39	0,15
			<i>Verossimilhança</i>	0,94	0,51	0,26			
SE		<i>A priori</i>	0,74	0,21	0,05	0,68	0,15	0,02	
		<i>Verossimilhança</i>	0,62	0,20	0,04				
SO		<i>A priori</i>	0,87	0,75	0,56	0,78	0,46	0,21	
		<i>Verossimilhança</i>	0,73	0,59	0,34				
N		<i>A priori</i>	1,34	0,59	0,35	1,26	0,37	0,14	
		<i>Verossimilhança</i>	1,21	0,47	0,22				

Fonte: Arquivo do autor.

Quando avaliados todos os setores, observa-se uma estimativa de recalque mais elevada para o cenário de 720 dias, com a estimativa de recalques *a priori* cerca de 17,5% superior à mesma estimativa de 360 dias, e o coeficiente de variação (desvio padrão dividido pela média) de 57% e iguais nos dois intervalos.

A função de verossimilhança, que contempla os resultados experimentais, apresenta, para 720 dias, um valor 54% superior ao recalque aos 360 dias e um coeficiente de variação de 70% e 54%, respectivamente.

Considerando a estimativa *a posteriori*, a diferença entre os recalques nos dois cenários é de 35% e o coeficiente de variação igual a 45% e 39%, menor no cenário de 720 dias.

A atualização reduziu a incerteza da previsão, sendo o valor da estimativa atualizada compreendido entre o da estimativa *a priori* e *de verossimilhança*, mais próxima àquele de menor variância (menor incerteza).

A atualização aproximou o valor estimado do valor medido pelo Método de Sowers, passando o grau de conservadorismo da estimativa para 20% e 5%, respectivamente para os cenários de 360 e 720 dias.

5.2 Atualizações do estudo de caso para o Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975)

Pelo Modelo de Yen e Scanlon (1975) no cenário de 360 dias, considerando os dados globais e para todos os dados parciais dos Setores, as estimativas obtidas *a priori* apresentam sempre superiores aos medidos, ou seja, conservativas. Reunindo os dados globais, o grau de conservadorismo está em torno de 18%. No entanto, para o cenário de 720 dias, os resultados previstos de recalques são inferiores aos medidos, tanto para os dados globais como por Setor, sendo o valor experimental 88% do valor de recalque estimado.

Quando avaliados todos os setores, observa-se uma estimativa de recalque mais elevada para o cenário de 720 dias, com a estimativa de recalques *a priori* cerca de 15% superior à mesma estimativa de 360 dias, e o coeficiente de variação (desvio padrão dividido pela média) de 59% e iguais nos dois intervalos.

Já a função de verossimilhança, que representa os valores medidos, a comparação é a mesma efetuada no item anterior, já que os valores experimentais independem do método de cálculo, naturalmente.

Considerando a estimativa *a posteriori*, a diferença entre os recalques nos dois cenários é de 33% e o coeficiente de variação igual a 45% e 40%, menor no cenário de 720 dias.

Cabe observar que a atualização reduziu de forma significativa a incerteza da previsão, sendo o valor da estimativa atualizada de recalque compreendida entre a estimativa *a priori* e a *de verossimilhança*, sendo mais próxima àquela de menor variância (menor incerteza).

Destaca-se que a atualização aproximou o valor estimado do valor medido pelo Método de Yen e Scanlon (1975), passando para 8% e -7%, respectivamente para os cenários de 360 e 720 dias.

A Tabela 3 resume os parâmetros obtidos para a aplicação do Teorema de Bayes.

Tabela 3 – Parâmetros da dist. *a posteriori* do recalque a partir do Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975).

PERÍODO	SETOR	PARCELA	MÉDIA μ (m)	D. PADRÃO σ (m)	VARIÂNCIA σ² (m²)	A POSTERIORI		
						μ (m)	σ (m)	σ² (m²)
360 dias	TODOS	<i>A priori</i>	0,72	0,43	0,19	0,66	0,30	0,09
		<i>Verossimilhança</i>	0,61	0,43	0,18			
	SE	<i>A priori</i>	0,46	0,19	0,04	0,39	0,12	0,01
		<i>Verossimilhança</i>	0,35	0,15	0,02			
	SO	<i>A priori</i>	0,58	0,45	0,21	0,53	0,31	0,09
		<i>Verossimilhança</i>	0,48	0,42	0,17			
	N	<i>A priori</i>	0,92	0,44	0,19	0,87	0,31	0,10
		<i>Verossimilhança</i>	0,81	0,44	0,20			
720 dias	TODOS	<i>A priori</i>	0,83	0,49	0,24	0,88	0,35	0,13
		<i>Verossimilhança</i>	0,94	0,51	0,26			
	SE	<i>A priori</i>	0,53	0,21	0,05	0,58	0,15	0,02
		<i>Verossimilhança</i>	0,62	0,20	0,04			
	SO	<i>A priori</i>	0,67	0,52	0,27	0,70	0,39	0,15
		<i>Verossimilhança</i>	0,73	0,59	0,34			
	N	<i>A priori</i>	1,05	0,49	0,24	1,13	0,34	0,12
		<i>Verossimilhança</i>	1,21	0,47	0,22			

Fonte: Arquivo do autor.

Em se tratando de estimativa de recalques, a proximidade dos valores estimados e medidos é muito satisfatória, sendo o método de Sowers (1973), mais adequado, por resultar em valores atualizados 5% superiores aos experimentais e, portanto, do lado da segurança, com incertezas atualizadas equivalentes.

5.3 Verificação da qualidade das atualizações

Segundo Guttormsen (1987), a atualização Bayesiana pode ser verificada através de um indicador de falha, possibilitando a avaliação da qualidade do resultado calculado. Dessa forma, tem-se:

$$D = (\mu_Q^L - \mu_Q^P) / \sqrt{(\sigma_Q^{2L} + \sigma_Q^{2P})} \quad (7)$$

Onde as variáveis já foram definidas anteriormente.

A Figura 3 exibe a comparação dos resultados dos indicadores de falha para as análises realizadas neste estudo. Observa-se que todos os valores se encontram dentro da faixa de valores satisfatórios (entre -1,5 e 1,5).

Em todos os setores os valores obtidos pelo modelo de Sowers para o período de 720 dias apresentam a mesma ordem de grandeza dos valores obtidos pelo modelo de Yen e Scanlon para o período de 360 dias.

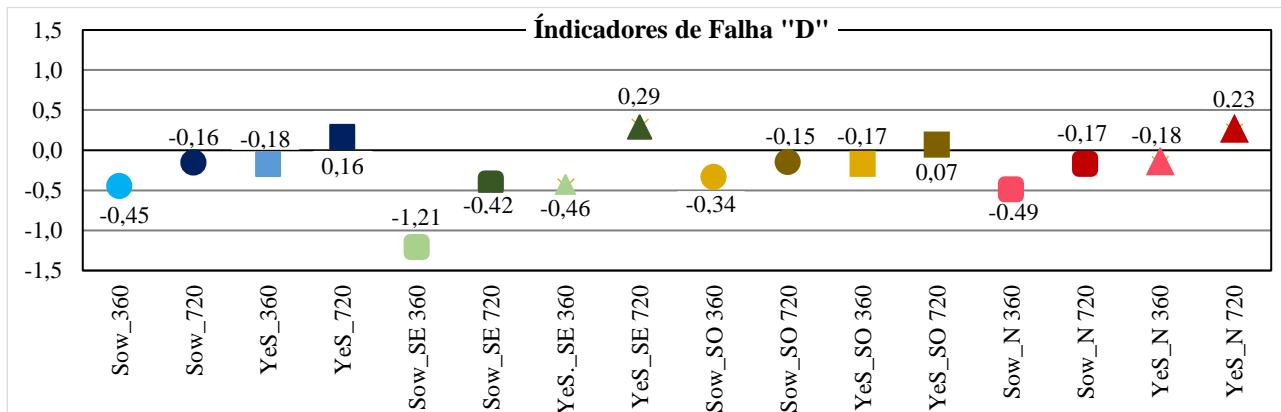


Figura 3 - Representação gráfica dos Indicadores de Falha “D” obtidos para as atualizações desse estudo.

De acordo com as interpretações propostas por Guttormsen (1987):

- Valores de “D” positivos indicam estimativa *a posteriori* superior àquela obtida *a priori*: Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (720 dias) - setores unificados, setores SE, SO e N;

- Valores de “D” negativos indicam estimativa *a posteriori* inferior àquela obtida *a priori*: Modelo de Sowers (360 e 720 dias) - setores unificados, setores SE, SO e N; Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (360 dias) - setores unificados, setores SE, SO e N.

5.4 Comparação entre os resultados

A seguir está apresentado um resumo comparativo das análises realizadas.

5.4.1 Estimativas *a priori* e função de verossimilhança

Foram calculados os parâmetros de distribuição normal considerando os modelos semiempíricos como estimativas *a priori* para cada um dos setores analisados.

Os resultados da formulação de Sowers apresentaram em todos os casos a maior estimativa de recalque dentro de cada período. Naturalmente, as médias do período de 720 dias são sempre superiores às de 360 dias.

Ao considerar todos os setores reunidos, as estimativas *a priori* para 360 dias tiveram variação de cerca de 50%, enquanto para 720 dias a variação foi de 13%. No setor sudeste, as estimativas apresentaram a maior variação observada, 80% para 360 dias e 16% para 720 dias. O setor norte, por sua vez, apresentou a menor variação observada em ambas análises de períodos, 41% e 11 % para 360 e 720 dias, respectivamente.

Ao comparar os valores dos 2 períodos para cada setor e para o conjunto, constata-se uma relação que se manteve em 17% entre o valor esperado do recalque (média) *a priori*, a 720 dias e 360 dias. Em relação às medições (*verossimilhança*) a faixa foi de 49% a 77%, com diferenças maiores na instrumentação.

Os dados *a priori* obtidos a partir do modelo de Sowers apresentaram os menores coeficientes de variação (menor incerteza) em ambos os períodos, exceto no setor Sudoeste. As menores incertezas para o Modelo de Sowers foram registradas no setor sudeste e as maiores no setor sudoeste, para ambos os períodos, como ilustra a Figura 4.

O setor sudeste a 360 dias foi o que apresentou a maior diferença de incerteza entre os métodos, enquanto a análise do conjunto a 720 dias a menor diferença, apresentando o modelo de Sowers com a menor incerteza.

Em relação aos valores experimentais (*verossimilhança*), houve uma incerteza maior entre os períodos (720 e 360 dias) do que a observada entre os dois diferentes modelos.

5.4.2 Atualização *a posteriori*

As atualizações pelo método de Sowers, em relação ao modelo de Yen e Scanlon, apresentaram em todos os casos a maior estimativa *a posteriori*, naturalmente superiores a 720 dias. As atualizações se mostraram superiores à verossimilhança em todas as análises de Sowers, exceto na região sudoeste, a 720 dias. No modelo de Yen e Scanlon as estimativas *a posteriori* foram superiores a 360 dias e inferiores a 720 dias.

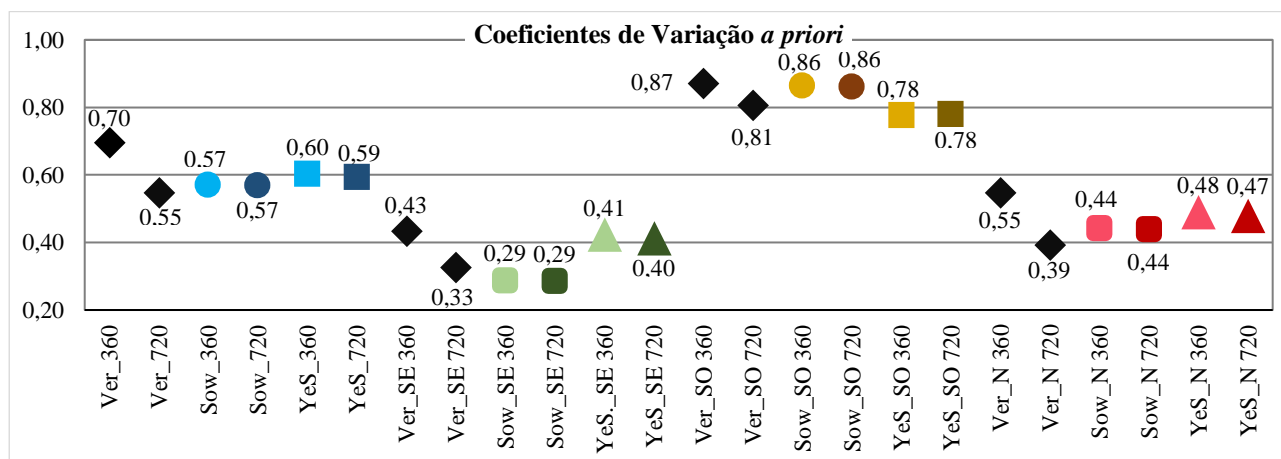


Figura 4 - Coeficientes de variação obtidos pelos modelos (*a priori*) nos períodos de 360 e 720 dias.

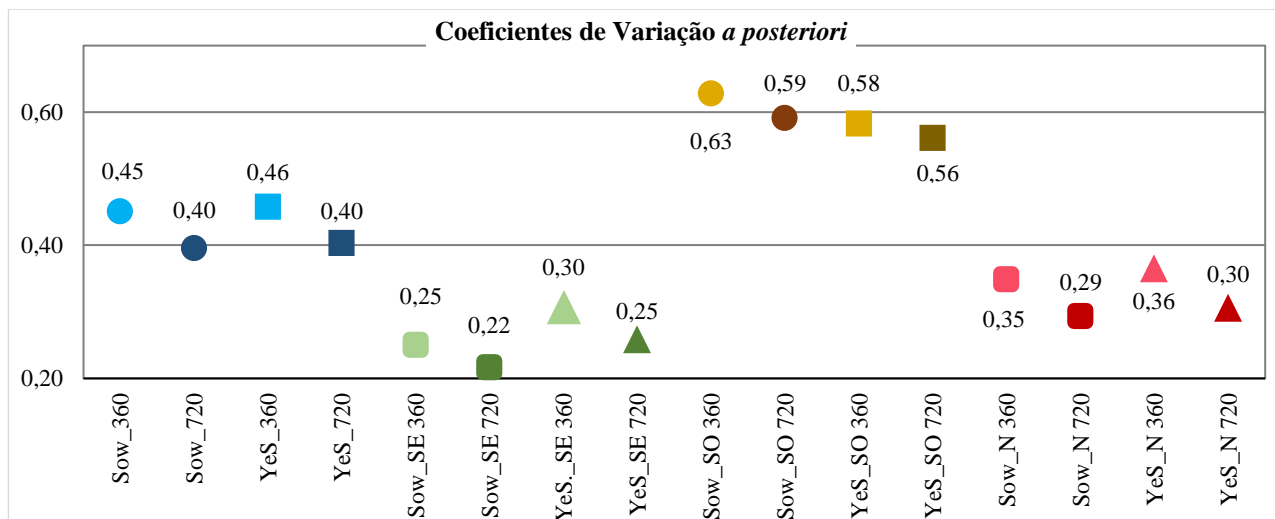


Figura 5 - Coeficientes de variação obtidos pelas atualizações (*a posteriori*) nos períodos de 360 e 720 dias.

Ao observar os coeficientes de variação gerados a partir da atualização dos recalques, verifica-se na Figura 5 que eles são sempre menores do que os coeficientes das demais distribuições. Este fato era esperado, visto que a distribuição *a posteriori* inclui ambas as informações, ou seja, a estimativa *a priori* e a função de *verossimilhança*, reduzindo assim a margem de incerteza da estimativa, objetivo desta pesquisa.

No geral, os coeficientes de variação foram menores no período de 720 dias em ambos modelos semiempíricos utilizados, com o menor registro verificado no setor sudeste, 0,22 (Sowers). Por outro lado, observa-se que os maiores coeficientes de variação foram obtidos para o setor sudoeste, com o modelo de Sowers apresentando para o período de 360 dias o maior valor absoluto registrado nas análises, 0,63.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme esperado, o recalque obtido *a posteriori* se apresentou sempre entre a faixa de valores obtidos *a priori* e os referentes à função de *verossimilhança*, se aproximando daquela que apresenta a menor variância.

Os coeficientes de variação, por sua vez, se apresentaram inferiores aos estimados *a priori* e aos aferidos a partir da função de *verossimilhança*, uma vez que a margem de incerteza da estimativa é reduzida à medida que são fornecidas mais informações. Os coeficientes dos dois modelos apresentam ordens de grandeza similares, com o modelo de Sowers indicando valores sutilmente menores e previsões conservativas.

Por fim, a interpretação dos indicadores de falha “D” demonstrou o caráter satisfatório das atualizações.

O modelo de Yen e Scanlon apresentou estimativas de menores recalques, contrários à segurança.

Diante do exposto, conclui-se pela adequabilidade da atualização de Bayes para a redução de incertezas na previsão de recalques em maciços de aterros sanitários, com pequena vantagem no emprego do modelo de Sowers (1973), face à menor incerteza e valores de estimativas a favor da segurança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brasil. (2010). Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Diário Oficial da União. Brasília, 2010.
- Cabral, E. V. (2008). *Contribuição à Confiabilidade de Estacas Cravadas através de um Estudo de Caso com Aplicação da Teoria Bayesiana*. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Rio de Janeiro, 2008.
- Lacasse, S., Tan, A. H., e Keaveny, J. M. (1991). *Expert Assistant for Updating Axial Pile Capacity from Pile Driving Observations*. Field Measurements in Geotechnics. Balkema, 1991.
- Sowers, G.F. (1973). *Settlement of waste disposal fills*. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rússia, 1973.
- Yen, B.C., Scanlon, B.S. (1975). *Sanitary landfill settlement rates*. Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, 1975.