



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

**Centro de Tecnologia e Ciências**

**Faculdade de Engenharia**

**Thiago Souza Ornelas Moraes**

**Contribuição da atualização bayesiana na estimativa de recalques:  
estudo de caso de um aterro sanitário**

**Rio de Janeiro**

**2024**

Thiago Souza Ornelas Moraes

**Contribuição da atualização bayesiana na estimativa de recalques: estudo de caso de um aterro sanitário**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadoras: Prof.<sup>a</sup>. Dra. Bernadete Ragoni Danziger

Prof.<sup>a</sup>. Dra. Alessandra Conde de Freitas

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M828 Moraes, Thiago Souza Ornelas.  
Contribuição da atualização bayesiana na estimativa de recalques:  
estudo de caso de um aterro sanitário / Thiago Souza Ornelas Moraes.  
– 2024.  
282 f.

Orientadoras: Bernadete Ragoni Danziger, Alessandra Conde de Freitas.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Recalque de estruturas - Teses. 3. Aterro sanitário - Teses. 4. Engenharia geotécnica - Teses. 5. Teoria bayesiana de decisão estatística - Teses. I. Danziger, Bernadete Ragoni. II. Freitas, Alessandra Conde de. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.13

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.



Assinatura



Data

Thiago Souza Ornelas Moraes

**Contribuição da atualização bayesiana na previsão de recalques: estudo de caso de um aterro sanitário**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

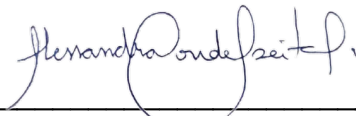
Aprovado em: 23 de fevereiro de 2024.

Banca Examinadora:



---

Profa. Dra. Bernadete Ragoni Danziger (Orientadora)  
Faculdade de Engenharia – UERJ



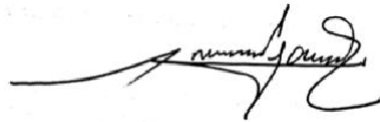
---

Profa. Dra. Alessandra Conde de Freitas (Orientadora)  
Universidade Federal do Rio de Janeiro



---

Prof. Dr. Claudio Fernando Mahler  
Faculdade de Engenharia – UFRJ



---

Prof. Dr. Marcus Peigas Pacheco  
Faculdade de Engenharia – UERJ

Rio de Janeiro

2024



## DEDICATÓRIA

A minha mãe e amiga que sempre me incentivou a estudar mesmo sem ter tido a mesma oportunidade, me criou e educou principalmente através de seus exemplos. E aos meus avós maternos, *in memoriam*, pelos ensinamentos deixados de herança.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo que fez por mim, por tudo que me deu e pelo zelo e cuidado que tem por mim a cada passo.

À minha mãe Nilcenéa Ornelas, pelo amor, carinho, exemplo, dedicação, perseverança e por todo apoio que me deu desde meu nascimento até hoje.

Aos meus queridos e eternos avós maternos, Roque e Juracy, *in memoriam*, por todo esforço e empenho em me tornar o homem que sou hoje.

À minha noiva e futura esposa Letícia Velasco, pelo apoio incondicional em todos os momentos e compreensão ao longo do desenvolvimento desse estudo.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup>. Dra. Bernadete Ragoni Danziger, pela excelente contribuição ao longo do curso e da orientação.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup>. Dra. Alessandra Conde de Freitas, pelo companheirismo e pelas contribuições preciosas durante a fase da dissertação.

Às minhas primas Alexandra Ornelas e Isabela Coelho, de onde veio a força e o carinho durante toda vida, e foram muitas vezes minhas professoras.

À professora de Ensino Médio Daniela Salomão, sem a qual não teria reconhecido meu real potencial.

Aos meus professores da graduação em Engenharia Civil e grandes amigos Carlos Cortes, Elaine Barreto e Rubem Reis por todo incentivo e reconhecimento.

Ao amigo descoberto no mestrado, Daniel Monteiro, pelas parcerias em estudos e trabalhos e incentivos ao longo da caminhada.

Ao amigo Caio Amêndola, pelo incentivo, ideias e generosidade ao longo da formação acadêmica e profissional.

A todos os excelentes professores do PGECIV/UERJ e de fora dele, dos quais tenho orgulho de ter sido aluno.

A minha psicóloga Marissol Almeida, pelo apoio emocional.

Ao amigo Douglas Lyrio, pela parceria e paciência ao longo desse processo.

Aos meus amigos, os verdadeiros anjos, do meio acadêmico e de fora dele, que estiveram comigo em toda trajetória.

A empresa ALTA Geotecnia Ambiental e aos profissionais e colegas que fazem parte dela, pelo incentivo científico e pela oportunidade de crescimento profissional.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram na caminhada de vida e estudos, meus sinceros agradecimentos.

Se você pode sonhar, você pode realizar.

*Walt Disney*

## RESUMO

MORAES, T. S. O. *Contribuição da atualização bayesiana na estimativa de recalques: estudo de caso de um aterro sanitário*. 2024. 282 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Rio de Janeiro, 2024.

Prever e monitorar recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos consiste num grande desafio deste tipo de estrutura. Este item é previsto na NBR 13.896/97 que preconiza as etapas essenciais de projeto de aterros de resíduos não perigosos. Muitos estudos e pesquisas têm sido desenvolvidos ao longo da história recente para estimar os recalques em aterros sanitários, com base em métodos teóricos e empíricos, considerando diversos fatores diferentes. Muitos desses métodos registrados na literatura são baseados em procedimentos empíricos associados a ajustes de dados experimentais. Esses dados experimentais, na maior parte dos casos, são obtidos em monitoramento de campo. No entanto, a heterogeneidade desse tipo de maciço dificulta a ampla aplicação das formulações desenvolvidas e torna muitas vezes o estudo do tema uma tarefa árdua, com complexas variáveis a serem consideradas. O presente trabalho pretende contribuir para o estudo da compressibilidade dos maciços sanitários, por meio da aplicação da atualização bayesiana na estimativa de recalques de um caso da Central de Tratamento de Resíduos, denominada Unidade 01, em Jaboatão dos Guararapes/PE, por meio da aplicação de modelos de previsão de recalques já existentes, combinados com dados do monitoramento do recalque real ocorrido na unidade. Para o desenvolvimento desse estudo, optou-se por adotar o modelo considerado clássico e mais utilizado para abordar o tema, o Modelo de Sowers (1973), que tem sua base fixada na adaptação da Teoria Clássica de Terzaghi para solos, e o Modelo de Yen e Scanlon (1975), que utiliza o conceito de idade média do aterro. Para a aplicação aos recalques dos resíduos sólidos foram utilizados os dados de monitoramento geotécnico mensal de 30 marcos superficiais com recalques bem definidos e com histórico de disposição de resíduos locais conhecido, em faixas de tempo de 720 dias entre 2019 e 2023. Foram empregados os conceitos de atualização estatística a partir da Teoria de Bayes (1812) que permite calcular a probabilidade de ocorrência de um evento “A” considerando que um evento “B” ocorreu. Para a determinação da curva de distribuição dos recalques *a priori* foram considerados os resultados fornecidos pelos modelos. A distribuição da função de verossimilhança foi obtida a partir da instrumentação. A estimativa atualizada dos recalques *posteriori* foi realizada utilizando a mesma proposta utilizada por Lacasse (1991) aplicada ao controle de execução de estacas offshore. O conceito de Indicador de Falha “D” (GUTTORMSEN, 1987) foi aplicado na avaliação dos resultados. 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; Instrumentação geotécnica.

## ABSTRACT

MORAES, T. S. O. *Contribution of the Bayesian update in the estimation of settlements: case study of a landfill*. 2024. 282 p. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Engineering School, Rio de Janeiro State University (UERJ). Rio de Janeiro, 2024.

Predicting and monitoring settlements in urban solid waste landfills is one of the most difficult challenges in this type of structure. This item is provided for in NBR 13.896/97, which recommends the essential stages of designing non-hazardous waste landfills. Many studies and research have been developed throughout recent history to estimate settlements in sanitary landfills, based on theoretical and empirical methods, considering several different factors. Many of these methods reported in the literature are based on empirical procedures associated with experimental data adjustments. These experimental data, in most cases, are obtained in field monitoring. However, the heterogeneity of this type of massif hinders the wide application of the developed formulations. It often makes studying the subject an arduous task, with complex variables to be considered. The present work intends to contribute to the study of the compressibility of sanitary massifs, by updating the predicted settlement of a Waste Treatment Center, called Unit 01, in Jaboatão dos Guararapes/PE, through the application of estimation models of existing settlements, combined with data from the monitoring of the real settlement that occurred in the unit, associated with concepts and theories of statistics. For the development of this study, we chose to adopt the model considered classic and most used to approach the topic, the Sowers Model, which has its basis in the adaptation of Terzaghi's Classical Theory (1973) for soils, and the Yen and Scanlon, which uses the concept of average landfill age. To study the compressibility that occurred in solid waste, data from monthly geotechnical monitoring of 30 surface landmarks with well-defined settlements and with known local waste disposal history were used, in intervals of 720 days ranging from 2019 to 2023. Statistics, based on Bayes' Theory (1812), which allows calculating the probability of an event "A" considering that an event "B" occurred, were used to estimate the posterior updates of the settlement of the surface landmarks used in the region, adopting as a function of likelihood the measured data, and as a priori data the results provided by models. Following the methodology initially proposed by Lacasse (1991) applied to piles, this study provides an application focused on the analysis of settlements in massive solid waste, opening a series of possibilities for this challenging topic. 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; Geotechnical instrumentation.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Percentual de Destinação de resíduos em alguns países. Fonte: Revista em Discussão nº 5 (2014, <i>apud</i> . MENDEZ, 2021).....      | 36 |
| Figura 2 - Destinação final dos resíduos no Brasil, por quantidade de resíduos (JUCÁ, 2003). ....                                               | 39 |
| Figura 3 - Destinação final dos resíduos no Brasil, por número de municípios (JUCÁ, 2003).....                                                  | 39 |
| Figura 4 - Evolução da destinação final dos resíduos no Brasil (JUCÁ, 2003). ....                                                               | 40 |
| Figura 5 - Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação, 2022 (ABRELPE, 2022). ....                                                 | 41 |
| Figura 6 – Metas da PNRS por tipo de destinação final de RSU até 2040 (ABRELPE, 2022).....                                                      | 42 |
| Figura 7 - Tipos de ARSU: Método da cava (TCHOBANOGLIOUS <i>et al.</i> , 1993). ....                                                            | 43 |
| Figura 8 - Tipos de ARSU: Método da depressão (TCHOBANOGLIOUS <i>et al.</i> , 1993). ....                                                       | 43 |
| Figura 9 - Tipos de ARSU: Método da superfície (TCHOBANOGLIOUS <i>et al.</i> , 1993). ....                                                      | 44 |
| Figura 10 - Efeito da compactação nos recalques de aterros sanitários (OWEIS E KHERA, 1986). ....                                               | 51 |
| Figura 11 - Relação entre o peso específico dos resíduos, o número de passadas do compactador e a espessura das camadas (SCHOMAKER, 1972). .... | 52 |
| Figura 12 - Distribuição das dimensões de partículas de RSU em diferentes idades (DE LAMARE NETO, 2004 <i>apud</i> . COSTA, 2013). ....         | 56 |
| Figura 13 - Variação do peso específico de RSU com a profundidade (KNOCHENMUS <i>et al.</i> , 1998). ....                                       | 59 |
| Figura 14 - Variação do peso específico com a profundidade (OWEIS E KHERA, 1986).....                                                           | 60 |
| Figura 15 – Variação do teor de umidade dos RSU com profundidade em maciços sanitários segundo alguns autores (BOSCOV, 2008).....               | 62 |
| Figura 16 - Curvas de compactação para diferentes tipos de resíduos, considerando teor de umidade (KONIN E JESSBERGER, 1997).....               | 66 |

|                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 17 – Mobilização do ângulo de atrito em resíduos com diferentes quantidades de materiais fibrosos com o avanço da deformação axial, segundo Konig e Jessberger, 1997 ( <i>apud.</i> NASCIMENTO, 2007).....   | 68  |
| Figura 18 - Mobilização do intercepto coesivo em resíduos com diferentes quantidades de materiais fibrosos com o avanço da deformação axial, segundo Konig e Jessberger, 1997 ( <i>apud.</i> NASCIMENTO, 2007)..... | 69  |
| Figura 19 - Faixas recomendadas de parâmetros de resistência dos RSU, segundo (a) Bouazza e Wojnarowics, 1999 e (b) Sanchez <i>et al.</i> , 1993 ( <i>apud.</i> BOSCOV, 2008).<br>.....                             | 71  |
| Figura 20 - Relação tensão-deformação típica dos RSU apresentada por Manassero <i>et al.</i> 1996 ( <i>apud.</i> BOSCOV, 2008). ....                                                                                | 73  |
| Figura 21 - Parâmetros de resistência mobilizados (a) ângulo de atrito e (b) coesão, em função do nível de deformação e idade, segundo Koning e Jessberger, 1997 ( <i>apud.</i> MARQUES, 2001). ....                | 74  |
| Figura 22 - Variação da resistência ao cisalhamento dos resíduos com a profundidade (SINGH E SUN, 1995). ....                                                                                                       | 76  |
| Figura 23 - Resultados de Ensaio SPT para maciços de resíduos em quatro maciços de resíduos do Nordeste do Brasil (JUCÁ, 2003). ....                                                                                | 78  |
| Figura 24 – Exemplo de MS Prisma com ponteira metálica no topo. ....                                                                                                                                                | 85  |
| Figura 25 - Exemplo de MS Tubo com fita refletiva. ....                                                                                                                                                             | 85  |
| Figura 26 – Detalhe de MS Prisma que receberá a ponteira metálica. ....                                                                                                                                             | 86  |
| Figura 27 – Detalhe de MS Tubo com fita reflexiva. ....                                                                                                                                                             | 86  |
| Figura 28 – Modelo trigonométrico de aferição de marco superficial (IDD, 2022). ....                                                                                                                                | 87  |
| Figura 29 - Definição da idade média do aterro - $t_1$ (YEN E SCANLON, 1975). ....                                                                                                                                  | 92  |
| Figura 30 - Esquema representativo do modelo proposto por Bjarngard e Edgers (BJARNGARD E EDGERS, 1990). ....                                                                                                       | 94  |
| Figura 31 – Esquema do Teorema de Bayes a partir da ocorrência de um evento qualquer A (SANTOS, 2007). ....                                                                                                         | 108 |
| Figura 32 – Relação entre as distribuições <i>a priori</i> , a função de verossimilhança e a distribuição <i>a posteriori</i> (adaptado de CABRAL, 2008). ....                                                      | 109 |
| Figura 33 – Foto de satélite do maciço de resíduos da Unidade 01 (GOOGLE EARTH). ....                                                                                                                               | 120 |
| Figura 34 - Esquema de um aterro sanitário - diversas fases (IPT, 2018). ....                                                                                                                                       | 121 |
| Figura 35 – Fase inicial da operação na Célula I (GOOGLE EARTH, 2007). ....                                                                                                                                         | 122 |

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 36 - Fase inicial da operação na Célula II (GOOGLE EARTH, 2015). ....                                                                          | 122 |
| Figura 37 – Principais acessos externos ao aterro sanitário (GOOGLE MAPS, 2018).<br>.....                                                             | 122 |
| Figura 38 - Mapa de localização .....                                                                                                                 | 123 |
| Figura 39 - Mapa geológico.....                                                                                                                       | 126 |
| Figura 40 - Configuração da Unidade 01 que será estudada. ....                                                                                        | 127 |
| Figura 41 – Planta baixa do aterro sanitário com indicação dos Marcos Superficiais<br>analisados.....                                                 | 129 |
| Figura 42 - Esquema representativo do procedimento de monitoramento de recalque<br>de aterro sanitário (SILVA, 2010). ....                            | 130 |
| Figura 43 - Variações de índice de compressão primária - $CC$ - em função do índice<br>de vazios inicial- $e_0$ - (CARVALHO, 1999). ....              | 132 |
| Figura 44 - Variações de índice de compressão secundária - $C\alpha$ - em função do<br>índice de vazios inicial- $e_0$ - (CARVALHO, 1999).....        | 134 |
| Figura 45 – Evolução do recalque com o tempo para todos os MS analisados a partir<br>do Modelo de Sowers (1973). ....                                 | 138 |
| Figura 46 – Evolução do recalque com o tempo para os MS do setor Sudeste,<br>analisados a partir do Modelo de Sowers (1973). ....                     | 138 |
| Figura 47 – Evolução do recalque com o tempo para os MS do setor Sudoeste<br>analisados a partir do Modelo de Sowers (1973). ....                     | 139 |
| Figura 48 – Evolução do recalque com o tempo para os MS do setor Norte<br>analisados a partir do Modelo de Sowers (1973). ....                        | 139 |
| Figura 49 - Variação da taxa de recalque com a altura e a idade média do aterro<br>(SOHN E LEE, 1994, <i>apud</i> . MARQUES, 2001).....               | 141 |
| Figura 50 – Evolução do recalque com o tempo para todos os MS analisados a partir<br>do Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975). ....             | 144 |
| Figura 51 – Evolução do recalque com o tempo para os MS do setor Sudeste,<br>analisados a partir do modelo simplificado de Yen e Scanlon (1975). .... | 145 |
| Figura 52 – Evolução do recalque com o tempo para os MS do setor Sudoeste<br>analisados a partir do modelo simplificado de Yen e Scanlon (1975). .... | 145 |
| Figura 53 – Evolução do recalque com o tempo para os MS do setor Norte<br>analisados a partir do Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975). ....    | 146 |
| Figura 54 – Evolução do recalque com o tempo aferido em todos os MS em<br>monitoramentos mensais. ....                                                | 148 |



|                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 55 – Evolução do recalque com o tempo aferido nos MS do setor Sudeste em monitoramentos mensais. ....                                                                                                      | 148 |
| Figura 56 – Evolução do recalque com o tempo aferido nos MS do setor Sudoeste em monitoramentos mensais. ....                                                                                                     | 149 |
| Figura 57 – Evolução do recalque com o tempo aferido nos MS do setor Norte em monitoramentos mensais. ....                                                                                                        | 149 |
| Figura 58 - Histograma relacionado com a distribuição normal do recalque no período de 360 dias: (a) Mod. de Sowers (1973) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> .....                | 152 |
| Figura 59 - Histograma relacionado com a distribuição normal do recalque no período de 720 dias: (a) Mod. de Sowers (1973) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> .....                | 152 |
| Figura 60 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 360 dias para o setor sudeste: (a) Mod. de Sowers (1973) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> .....  | 153 |
| Figura 61 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 720 dias para o setor sudeste: (a) Mod. de Sowers (1973) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> .....  | 154 |
| Figura 62 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 360 dias para o setor sudoeste: (a) Mod. de Sowers (1973) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> ..... | 154 |
| Figura 63 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 720 dias para o setor sudoeste: (a) Mod. de Sowers (1973) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> ..... | 154 |
| Figura 64 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 360 dias para o setor norte: (a) Mod. de Sowers (1973) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> . ....   | 154 |
| Figura 65 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 720 dias para o setor norte: (a) Mod. de Sowers (1973) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> . ....   | 155 |
| Figura 66 – Distribuição normal realizada para todos os setores no período de 360 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                               | 156 |
| Figura 67 – Distribuição normal realizada para todos os setores no período de 720 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                               | 156 |

|                                                                                                                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 68 – Distribuição normal realizada para o setor sudeste no período de 360 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                                              | 157 |
| Figura 69 – Distribuição normal realizada para o setor sudeste no período de 720 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                                              | 157 |
| Figura 70 – Distribuição normal realizada para o setor sudoeste no período de 360 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                                             | 158 |
| Figura 71 – Distribuição normal realizada para o setor sudoeste no período de 720 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                                             | 158 |
| Figura 72 – Distribuição normal realizada para o setor norte no período de 360 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                                                | 159 |
| Figura 73 – Distribuição normal realizada para o setor norte no período de 720 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                                                | 159 |
| Figura 74 - Histograma relacionado com a distribuição normal do recalque no período de 360 dias: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> . ....                | 161 |
| Figura 75 - Histograma relacionado com a distribuição normal do recalque no período de 720 dias: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> . ....                | 161 |
| Figura 76 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 360 dias para o setor sudeste: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> . ....  | 162 |
| Figura 77 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 720 dias para o setor sudeste: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> . ....  | 163 |
| Figura 78 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 360 dias para o setor sudoeste: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> . .... | 163 |
| Figura 79 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 720 dias para o setor sudoeste: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> . .... | 163 |
| Figura 80 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 360 dias para o setor norte: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> . ....    | 163 |

|                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 81 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 720 dias para o setor norte: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – <i>A priori</i> ; e (b) Aferição de MS – <i>Verossimilhança</i> .....                           | 164 |
| Figura 82 – Distribuição normal realizada para todos os setores no período de 360 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                                                      | 165 |
| Figura 83 – Distribuição normal realizada para todos os setores no período de 720 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                                                      | 165 |
| Figura 84 – Distribuição normal realizada para o setor sudeste no período de 360 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                                                       | 166 |
| Figura 85 – Distribuição normal realizada para o setor sudeste no período de 720 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                                                       | 166 |
| Figura 86 – Distribuição normal realizada para o setor sudoeste no período de 360 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                                                      | 167 |
| Figura 87 – Distribuição normal realizada para o setor sudoeste no período de 720 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                                                      | 167 |
| Figura 88 – Distribuição normal realizada para o setor norte no período de 360 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                                                         | 168 |
| Figura 89 – Distribuição normal realizada para o setor norte no período de 720 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa <i>a priori</i> . ....                                                                         | 168 |
| Figura 90 - Representação gráfica dos Indicadores de Falha “D” obtidos para as atualizações desse estudo. ....                                                                                                                                        | 171 |
| Figura 91 - Recalques médios estimados para os marcos superficiais de todos os setores analisados, tendo como base os dois modelos de cálculo utilizados ( <i>a priori</i> ) e os dados de aferição em monitoramento ( <i>verossimilhança</i> ). .... | 175 |
| Figura 92 - Coeficientes de variação obtidos pelos modelos utilizados ( <i>a priori</i> ) nos períodos de 360 e 720 dias. ....                                                                                                                        | 177 |

|                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 93 - Recalques atualizados para os marcos superficiais de todos os setores analisados, tendo como base os dois modelos de cálculo utilizados ( <i>a priori</i> ) e os dados de aferição em monitoramento (verossimilhança). .... | 179 |
| Figura 94 - Coeficientes de variação obtidos pelas atualizações ( <i>a posteriori</i> ) nos períodos de 360 e 720 dias. ....                                                                                                            | 181 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 – Gestão de RSU no Brasil e em alguns países desenvolvidos (MAIA <i>et al.</i> , 2016).....                                                                                                                | 37  |
| Tabela 2 - Geração de resíduos sólidos no Brasil (adaptado de JUCÁ, 2003). ....                                                                                                                                     | 40  |
| Tabela 3 - Composição de RSU para diferentes localidades (adaptada de BOUAZZA <i>et al.</i> , 1996).....                                                                                                            | 54  |
| Tabela 4 – Pesos específicos para RSU por diversos autores (adaptada de COSTA, 2013).....                                                                                                                           | 57  |
| Tabela 5 - Peso específico em função do grau de compactação (adaptada de GACHET <i>et al.</i> , 1998) .....                                                                                                         | 58  |
| Tabela 6 - Valores para o teor de umidade de RSU (MARQUES, 2001). ....                                                                                                                                              | 61  |
| Tabela 7 - Valores de coeficiente de permeabilidade de RSU apresentados por diversos autores (adaptada de BOSCOV, 2008).....                                                                                        | 64  |
| Tabela 8 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU apresentados por diversos autores (adaptada de BOSCOV, 2008).....                                                                                      | 69  |
| Tabela 9 – Métodos de determinação da resistência ao cisalhamento do RSU (adaptada de DIXON, 2005).....                                                                                                             | 72  |
| Tabela 10 - Parâmetros de resistência estimados por retroanálises (KAVAZAJIAN <i>et al.</i> , 1995).....                                                                                                            | 78  |
| Tabela 11 – Recalques em maciços sanitários (BOSCOV, 2008). ....                                                                                                                                                    | 79  |
| Tabela 12 – Modelos unidimensionais de recalques de aterros sanitários (CATAPRETA, 2008). ....                                                                                                                      | 89  |
| Tabela 13 – Resumo de algumas distribuições conjugadas normalmente utilizadas na inferência bayesiana (adaptado de SANTOS, 2007). ....                                                                              | 111 |
| Tabela 14 – Resumo de dados e procedimentos realizados em bibliografia relacionada à formulação de Lacasse baseada na Análise Bayesiana fora do seu contexto inicial <i>offshore</i> (adaptado de SILVA, 2023)..... | 114 |
| Tabela 15 – Classificação de previsões (adaptado de LAMBE, 1973). ....                                                                                                                                              | 116 |
| Tabela 16 – Resumo dos condicionantes regionais de meio físico local. ....                                                                                                                                          | 125 |
| Tabela 17 – Localização dos Marcos Superficiais analisados.....                                                                                                                                                     | 128 |
| Tabela 18 – Período de monitoramento dos Marcos Superficiais analisados. ....                                                                                                                                       | 130 |

|                                                                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 19 – Valores típicos do coeficiente de compressão primária ( $C'C$ ) obtidos através de ensaios de laboratório ou monitoramento de campo (COELHO, 2000).                                  | 133 |
| Tabela 20 – Valores típicos do coeficiente de compressão secundária ( $C'\alpha$ ) obtidos através de ensaios de laboratório ou monitoramento de campo disponíveis em literatura (COELHO, 2000). | 135 |
| Tabela 21 – Coeficientes de compressão secundária ( $C'\alpha$ ) obtidos através do modelo de Sowers (1973).                                                                                     | 136 |
| Tabela 22 – Recalques previstos para os marcos superficiais no período de 360 e 720 dias através do modelo de Sowers (1973).                                                                     | 137 |
| Tabela 23 – Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) médios obtidos por alguns autores para o Modelo de Yen & Scanlon (1975).                                                                      | 141 |
| Tabela 24 – Parâmetros obtidos do Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975).                                                                                                                   | 142 |
| Tabela 25 – Recalques previstos para os marcos superficiais no período de 360 e 720 dias através do Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975).                                                 | 143 |
| Tabela 26 – Recalques aferidos em monitoramento no período de 360 e 720 dias.                                                                                                                    | 147 |
| Tabela 27 – Parâmetros da distribuição <i>a posteriori</i> do recalque para todos os setores a partir do Modelo de Sowers (1973).                                                                | 151 |
| Tabela 28 – Parâmetros da distribuição <i>a posteriori</i> do recalque para cada setor a partir do Modelo de Sowers (1973).                                                                      | 153 |
| Tabela 29 – Parâmetros da distribuição <i>a posteriori</i> do recalque para todos os setores a partir do modelo simplificado de Yen e Scanlon (1975).                                            | 160 |
| Tabela 30 – Parâmetros da distribuição <i>a posteriori</i> do recalque para cada setor a partir do Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975).                                                  | 162 |
| Tabela 31 - Indicadores de Falha (D) obtidos nas análises realizadas para os períodos de 360 e 720 dias.                                                                                         | 170 |
| Tabela 32 - Parâmetros da distribuição normal da função de verossimilhança (monitoramento de marcos superficiais) no período de 360 dias para todos os setores.                                  | 173 |
| Tabela 33 - Parâmetros da distribuição normal da função de verossimilhança (monitoramento de marcos superficiais) no período de 720 dias para todos os setores.                                  | 173 |

|                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 34 - Parâmetros da distribuição <i>a priori</i> do recalque para os dois modelos analisados no período de 360 dias para todos os setores.....     | 174 |
| Tabela 35 - Parâmetros da distribuição <i>a priori</i> do recalque para os dois modelos analisados no período de 720 dias para todos os setores.....     | 174 |
| Tabela 36 - Parâmetros da distribuição <i>a posteriori</i> do recalque para os dois modelos analisados no período de 360 dias para todos os setores..... | 178 |
| Tabela 37 - Parâmetros da distribuição <i>a posteriori</i> do recalque para os dois modelos analisados no período de 720 dias para todos os setores..... | 178 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |                                                   |
|-------|---------------------------------------------------|
| 5R    | Repensar, Recusar, Reduzir, Reutilizar e Reciclar |
| ABNT  | Associação Brasileira de Normas Técnicas          |
| ARSU  | Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos                |
| ASTM  | <i>American Society of Civil Engineers</i>        |
| AU    | Austrália                                         |
| BO    | Bolívia                                           |
| BR    | Brasil                                            |
| CA    | Canadá                                            |
| CCL   | <i>Compacted Clay Liner</i>                       |
| CD    | Compactação Dinâmica                              |
| CH    | Suíça                                             |
| CN    | China                                             |
| CPRM  | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais        |
| CPT   | <i>Cone Penetration Test</i>                      |
| CU    | <i>Consolidated Undrained</i>                     |
| CV    | Coeficiente de Variação                           |
| DH    | Distância Horizontal                              |
| DN    | Diferença de Nível                                |
| ETC8  | <i>European Technical Committee 8</i>             |
| EUA   | Estados Unidos da América                         |
| FEN   | Faculdade de Engenharia                           |
| GCL   | <i>Geosynthetic Clay Liner</i>                    |
| GM    | Geomembrana                                       |
| GR    | Grécia                                            |
| IBGE  | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística   |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia                |
| KN    | Quênia                                            |
| Máx   | Máximo                                            |



|      |                                                  |
|------|--------------------------------------------------|
| Mín  | Mínimo                                           |
| MS   | Marco Superficial                                |
| MSW  | <i>Municipal Solid Waste</i>                     |
| NBR  | Norma brasileira                                 |
| NC   | Nível de Chorume                                 |
| NSPT | Índice de Resistência à Penetração do Solo       |
| PE   | Pernambuco                                       |
| PEAD | Polietileno de Alta Densidade                    |
| PNRS | Política Nacional de Resíduos Sólidos            |
| PNSB | Pesquisa Nacional de Saneamento Básico           |
| RJ   | Rio de Janeiro                                   |
| RS   | Rio Grande do Sul                                |
| RSU  | Resíduo Sólido Urbano                            |
| SASW | <i>Spectral Analysis of Surface Wave</i>         |
| Sow  | Sowers                                           |
| SP   | São Paulo                                        |
| SPT  | <i>Standard Penetration Test</i>                 |
| TH   | Tailandia                                        |
| TR   | Turquia                                          |
| UERJ | Universidade do Estado do Rio de Janeiro         |
| UFRJ | Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro |
| US   | <i>United States of America</i>                  |
| UU   | <i>Unconsolidated Undrained</i>                  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                |                                                                   |
|----------------|-------------------------------------------------------------------|
| $\Delta\sigma$ | Acréscimo de tensão vertical no meio da camada                    |
| $H_f$          | Altura do aterro (Yen e Scanlon, 1975)                            |
| $h(pv)$        | Altura do ponto visado                                            |
| $h(t)$         | Altura do teodolito                                               |
| $\varphi$      | Ângulo de atrito                                                  |
| $i$            | Ângulo vertical de inclinação                                     |
| $C_c$          | Coeficiente de compressão primária                                |
| $C_\alpha$     | Coeficiente de compressão secundária                              |
| $C_{\alpha 2}$ | Coeficiente de compressão secundária de longo prazo               |
| $C_{\alpha 1}$ | Coeficiente de compressão secundária intermediária                |
| $k_h$          | Coeficiente de hidrolisação                                       |
| $\alpha$       | Coeficiente de perda de massa (Meruelo, 1995)                     |
| $\nu$          | Coeficiente de Poisson                                            |
| $C$            | Coesão                                                            |
| $K$            | Constante de decaimento durante o preenchimento (Oweis, 2006)     |
| $K'$           | Constante de decaimento pós-preenchimento (Oweis, 2006)           |
| $a$            | Constante de recalque unitário (Gandolla <i>et al.</i> , 1992)    |
| $k$            | Constante de taxa de decomposição (Gandolla <i>et al.</i> , 1992) |
| $\varepsilon$  | Deformação secundária                                             |
| $\sigma$       | Desvio padrão de uma amostra de dados                             |
| $H_0$          | Espessura inicial da camada                                       |

|                               |                                                                                                    |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\sum_{j=1}^k P(A/B_i)P(B_i)$ | Fator de normalização ou ponderação                                                                |
| $\beta$                       | Fração da massa de RSU com potencial de converter em gás (Oweis, 2006)                             |
| $t_1$                         | Idade média do aterro (Yen e Scanlon, 1975)                                                        |
| $C_c$                         | Índice de compressão primária                                                                      |
| $C_\alpha$                    | Índice de compressão secundária                                                                    |
| $C_\alpha'$                   | Índice de compressão secundária modificado em termos de deformação (Oweis, 2006)                   |
| $D$                           | Índice de falha                                                                                    |
| $e$                           | Índice de vazios                                                                                   |
| $e_0$                         | Índice de vazios inicial                                                                           |
| $\Delta t$                    | Intervalo de tempo                                                                                 |
| $\mu$                         | Média de uma variável aleatória                                                                    |
| $G$                           | Módulo de cisalhamento                                                                             |
| $E$                           | Módulo de deformação/ elasticidade                                                                 |
| $a$ e $b$                     | Parâmetros que variam com altura do aterro e o tempo de construção do maciço (Yen e Scanlon, 1975) |
| $W$                           | Peso de uma amostra de determinado material                                                        |
| $W_1$                         | Peso de uma amostra após secagem                                                                   |
| $\gamma$                      | Peso específico aparente                                                                           |
| $\gamma_s$                    | Peso específico dos sólidos                                                                        |
| $W_0$                         | Peso inicial de uma amostra de determinado material                                                |
| $P(A/B_i)$                    | Probabilidade condicional de ocorrência do evento A, dado que o evento $B_i$ ocorreu               |
| $P(B_i/A)$                    | Probabilidade condicional de ocorrência do evento $B_i$ , dado que o evento A ocorreu              |
| $P(B_i)$                      | Probabilidade de ocorrer o evento $B_i$                                                            |

|                                 |                                                                                               |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $COD$                           | Quantidade de matéria orgânica biodegradável                                                  |
| $\Delta H$                      | Recalque total                                                                                |
| $\Delta H_d$                    | Recalque adicional devido a decomposição no tempo tpc                                         |
| $\Delta H_{stc}$                | Recalque adicional devido ao <i>creep</i> no tempo t                                          |
| $H_d$                           | Recalque estimado devido a decomposição no tempo tc                                           |
| $H_{stc}$                       | Recalque estimado devido <i>creep</i> durante preenchimento                                   |
| $\Delta H_1$                    | Recalque primário                                                                             |
| $\Delta H_2$                    | Recalque secundário                                                                           |
| $\Delta \varepsilon / \Delta t$ | Taxa de deformação vertical (Coumoulos e Koryalos, 1999)                                      |
| $m'$                            | Taxa de preenchimento (Oweis, 2006)                                                           |
| $m$                             | Taxa de recalque (Yen e Scanlon, 1975)                                                        |
| $t_1$                           | Tempo 1 decorrido após o encerramento do aterro (Coumoulos e Koryalos, 1999)                  |
| $t_c$                           | Tempo de construção do aterro (Yen e Scanlon, 1975; Meruelo, 1995; Oweis, 2006)               |
| $t$                             | Tempo de início da construção do aterro (Yen e Scanlon, 1975)                                 |
| $t_0$                           | Tempo do momento de encerramento do aterro (Coumoulos e Koryalos, 1999)                       |
| $t$                             | Tempo final decorrido após o encerramento do aterro (Coumoulos e Koryalos, 1999; Oweis, 2006) |
| $t_2$                           | Tempo final do período para obtenção do recalque secundário (Sowers, 1973)                    |
| $t_1$                           | Tempo inicial do período para obtenção do recalque secundário (Sowers, 1973)                  |
| $t_{pc}$                        | Tempo maior do que o preenchimento do aterro tc (Oweis, 2006)                                 |
| $t_1$                           | Tempo para conclusão da compressão inicial (Bjarngard e Edgers, 1990)                         |
| $t_2$                           | Tempo para conclusão da compressão intermediária (Bjarngard e Edgers, 1990)                   |

|                 |                                                                                                               |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $t_3$           | Tempo para o qual é feita a previsão do recalque (Bjarngard e Edgers, 1990)                                   |
| $t$             | Tempo para o qual é feita a previsão do recalque (Sowers, 1973; Gandolla <i>et al.</i> , 1992; Meruelo, 1995) |
| $\sigma'_0$     | Tensão efetiva vertical inicial no meio da camada                                                             |
| $w$             | Teor de umidade                                                                                               |
| $w_d$           | Teor de umidade em termos de peso seco                                                                        |
| $w_w$           | Teor de umidade em termos de peso úmido                                                                       |
| $\mu_Q$         | Valor esperado atualizado <i>a posteriori</i>                                                                 |
| $\mu_Q^P$       | Valor esperado previsto <i>a priori</i>                                                                       |
| $\mu_Q^L$       | Valor esperado em função de verossimilhança                                                                   |
| $\Delta e$      | Variação do índice de vazios                                                                                  |
| $\sigma^2$      | Variância de uma distribuição                                                                                 |
| $\sigma_Q^2$    | Variância da distribuição atualizada <i>a posteriori</i>                                                      |
| $\sigma_Q^{2P}$ | Variância da distribuição prevista <i>a priori</i>                                                            |
| $\sigma_Q^{2L}$ | Variância da distribuição em função de verossimilhança                                                        |

## SUMÁRIO

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                 | <b>27</b> |
| Objetivo.....                                                          | 29        |
| Motivação .....                                                        | 29        |
| Estrutura da dissertação .....                                         | 30        |
| <b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                    | <b>32</b> |
| <b>1.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).....</b>                         | <b>32</b> |
| <b>1.2 Tratamento de RSU.....</b>                                      | <b>33</b> |
| 1.2.1 Aspectos históricos .....                                        | 33        |
| 1.2.2 Políticas de Tratamentos de Resíduos .....                       | 35        |
| 1.2.3 A situação dos resíduos no Brasil .....                          | 39        |
| <b>1.3 Aterros Sanitários .....</b>                                    | <b>42</b> |
| 1.3.1 Aspectos da implantação de um aterro sanitário .....             | 45        |
| 1.3.2 Operação de um aterro sanitário .....                            | 48        |
| • Compactação de resíduos.....                                         | 48        |
| <b>1.4 Caracterização de maciços de resíduos sólidos urbanos .....</b> | <b>53</b> |
| 1.4.1 Propriedades físicas.....                                        | 54        |
| • Composição gravimétrica e granulométrica .....                       | 54        |
| • Peso específico .....                                                | 56        |
| • Teor de umidade .....                                                | 60        |
| • Índice de vazios.....                                                | 62        |
| • Temperatura.....                                                     | 63        |
| • Permeabilidade .....                                                 | 64        |
| 1.4.2 Propriedades mecânicas .....                                     | 67        |
| • Resistência ao cisalhamento .....                                    | 68        |
| • Compressibilidade e recalque.....                                    | 79        |
| <b>1.5 Aferição de recalque em aterros sanitários .....</b>            | <b>85</b> |
| 1.5.1 Marcos Superficiais.....                                         | 85        |
| <b>1.6 Modelos de previsão de recalques de Aterros Sanitários.....</b> | <b>87</b> |
| 1.6.1 Modelo de Sowers (1973) .....                                    | 90        |
| 1.6.2 Modelo de Yen e Scanlon (1975) .....                             | 91        |

|                                                                                                        |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1.6.3 Modelo de Bjarngard e Edgers (1990).....                                                         | 93         |
| 1.6.4 Modelo de Gandolla <i>et al.</i> (1992) .....                                                    | 95         |
| 1.6.5 Modelo de Meruelo (1995) .....                                                                   | 95         |
| 1.6.6 Modelo de Coumoulos e Koryalos (1999).....                                                       | 97         |
| 1.6.7 Modelo de Oweis (2006) .....                                                                     | 97         |
| 1.6.8 Outros modelos.....                                                                              | 99         |
| <b>1.7 Aplicações recentes de modelos de previsão de recalque de aterro</b>                            |            |
| <b>sanitários .....</b>                                                                                | <b>101</b> |
| <b>1.8 Teorema de Bayes .....</b>                                                                      | <b>106</b> |
| 1.8.1 Anatomia das previsões .....                                                                     | 116        |
| 1.8.2 Aplicação da teoria bayesiana na estimativa de recalques .....                                   | 117        |
| 1.8.3 Determinação de recalque <i>a priori</i> , função de verossimilhança e <i>a posteriori</i> ..... | 118        |
| <b>2 ESTUDO DE CASO .....</b>                                                                          | <b>119</b> |
| 2.1 Histórico do empreendimento.....                                                                   | 119        |
| 2.2 Localização do empreendimento .....                                                                | 122        |
| 2.3 Geologia e hidrogeologia .....                                                                     | 124        |
| 2.4 Caracterização do empreendimento .....                                                             | 127        |
| 2.5 Determinação dos instrumentos analisados .....                                                     | 128        |
| <b>3 PREVISÃO DO RECALQUE A <i>PRIORI</i>.....</b>                                                     | <b>131</b> |
| 3.1 Previsão de recalques pelo Modelo Clássico de Sowers (1973) .....                                  | 131        |
| 3.2 Previsão de recalques pelo Modelo de Yen e Scanlon (1975) .....                                    | 140        |
| <b>4 RECALQUES AFERIDOS – FUNÇÃO DE VEROSSIMILHANÇA.....</b>                                           | <b>147</b> |
| 4.1 Aferição dos marcos superficiais do estudo de caso .....                                           | 147        |
| <b>5 ATUALIZAÇÃO DO RECALQUE - A <i>POSTERIORI</i>.....</b>                                            | <b>151</b> |
| 5.1 Atualizações do estudo de caso para o Modelo de Sowers (1973) .....                                | 151        |
| 5.2 Atualizações do estudo de caso para o Modelo Simplificado de Yen e<br>Scanlon (1975) .....         | 160        |
| <b>6 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                                                | <b>170</b> |
| 6.1 Verificação da qualidade das atualizações .....                                                    | 170        |
| 6.2 Comparação entre os resultados.....                                                                | 173        |
| 6.2.1 Estimativas <i>a priori</i> e função de verossimilhança .....                                    | 173        |
| 6.2.2 Atualização <i>a posteriori</i> .....                                                            | 177        |
| <b>7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....</b>                                           | <b>182</b> |
| 7.1 Conclusões.....                                                                                    | 182        |

|                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.2 Sugestões para pesquisas futuras .....                                                                        | 186 |
| REFERÊNCIAS .....                                                                                                 | 187 |
| APÊNDICE I – PLANILHAS DE CÁLCULO DE RECALQUE PARA CADA MS<br>PELO MODELO DE SOWERS (1973).....                   | 199 |
| APÊNDICE II – PLANILHA RESUMO DE RECALQUES OBTIDOS PELO MODELO<br>DE SOWERS (1973).....                           | 215 |
| APÊNDICE III – PLANILHA RESUMO DE RECALQUES AFERIDOS NOS MS ...                                                   | 216 |
| APÊNDICE IV – PLANILHAS DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL ASSOCIADA AO<br>MODELO DE SOWERS (1673) .....                      | 217 |
| APÊNDICE V – PLANILHAS DE CONSTRUÇÃO DOS HISTOGRAMAS<br>ASSOCIADOS AO MODELO DE SOWERS (1673) .....               | 225 |
| APÊNDICE VI – PLANILHAS DE CÁLCULO DE RECALQUE PARA CADA MS<br>PELO MODELO SIMP. DE YEN E SCANLON (1975) .....    | 241 |
| APÊNDICE VII – PLANILHA RESUMO DE RECALQUES OBTIDOS PELO<br>MODELO SIMP. DE YEN E SCANLON (1975) .....            | 253 |
| APÊNDICE VIII – PLANILHAS DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL ASSOCIADA AO<br>MODELO SIMP. DE YEN E SCANLON (1675) .....       | 254 |
| APÊNDICE IX – PLANILHAS DE CONSTRUÇÃO DOS HISTOGRAMAS<br>ASSOCIADOS AO MODELO SIMP. DE YEN E SCANLON (1975) ..... | 262 |
| APÊNDICE X – AVALIAÇÃO DA QUALIFICAÇÃO .....                                                                      | 278 |



## 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. Para minimizar esses efeitos, a gestão integrada de resíduos desenvolvida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, entendida como a maneira de conceber, implementar e administrar sistemas de manejo de resíduos sólidos urbanos, atualmente preconiza os 5R – Repensar, Recusar, Reduzir, Reutilizar e Reciclar. Busca-se então, a redução de geração de novos resíduos, resultando em menor disposição dos mesmos no seu destino final, no encerramento do ciclo do produto.

Recentemente, a Europa utilizou dados de meados dos anos 90, em que 66% do total gerado de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) tinham o solo como destino, para embasar um compromisso de diminuição de geração de novos resíduos.

A reciclagem de elementos, compostagem de matéria orgânica e a incineração em altas temperaturas são, atualmente, algumas alternativas na busca por eliminar o crescimento do acúmulo desses resíduos. Porém, ainda assim, restos não destinados a fins específicos acabam sendo descartados.

Atualmente, em razão do contínuo desenvolvimento tecnológico e da crescente preocupação geral com o meio ambiente, há melhor planejamento na destinação desses resíduos para locais adequados, dentre eles os Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (ARSU). No entanto, a redução do impacto ambiental com utilização de aterros sanitários envolve a adequada seleção do local, seu projeto global, detalhamento dos componentes do seu sistema, qualidade dos materiais empregados, correta operação, monitoramento frequente e o devido encerramento.

O aterro de resíduos compreende um sistema devidamente preparado para a disposição dos resíduos, desde preparação da sua base, com realização de obras de terraplanagem, implementação de camadas de impermeabilização, instalação de sistemas de drenagem e implantação de instrumentos de monitoramento geotécnico, até a sua cobertura final com camadas de solo e utilização de geossintéticos diversos.

Esta estrutura passou a ser utilizada nos EUA a partir da década de 70, e no Brasil, o Aterro Sanitário de Bandeirantes, situado em São Paulo, foi pioneiro na década de 90. Diferente da maioria das demais obras da Engenharia, a obra de um aterro sanitário é o próprio empreendimento. Enquanto em edifícios, pontes e barragens é necessário o término da obra para o desempenho da respectiva função,

no aterro sanitário, o empreendimento e a obra coincidem, e o final da obra corresponde ao término de sua função, caracterizado, portanto, como um empreendimento dinâmico.

No entanto, o processo de expansão e adensamento urbano, aliado às restrições ambientais e às elevadas taxas de geração de resíduos sólidos, tem limitado a viabilização de novos aterros sanitários. Apresenta-se então como importante fator o aumento da vida útil e o máximo aproveitamento da capacidade disponível das unidades existentes, com priorização de métodos e técnicas executivas que imprimam maiores densidades aos resíduos. Além deste aspecto, cabe destacar a necessidade de um melhor entendimento do comportamento a médio e longo prazo destes maciços. Deve ser acrescentada a importância do reaproveitamento e recuperação de antigas áreas de passivos ambientais, as quais demandam o conhecimento das condições geomecânicas do maciço, assim como a previsão do seu comportamento futuro.

Os ARSU devem possuir a operação e o monitoramento adequados da disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU), para que se configurem como unidades de tratamento de resíduos, e assim não causem danos ao meio ambiente. Devido aos mecanismos físicos, químicos e biológicos envolvidos e que influenciam diretamente o comportamento geral do aterro, a disposição de resíduos em aterros requer uma série de critérios operacionais e geotécnicos bastante complexos. Os critérios que podem ser citados são: composição dos resíduos (porcentagem de materiais, peso específico e teor de umidade); formas de disposição (altura e inclinação dos taludes das camadas de resíduos e tipo de equipamento compactador); características das camadas de cobertura; configuração dos sistemas de drenagem de lixiviados e gases; configuração do sistema de drenagem pluvial. Em alguns casos, é considerada ainda a configuração do sistema de drenagem de águas subsuperficial, que minimiza efeitos de pressões hidráulicas sob o maciço.

A eficiência e os cuidados com disposição do RSU constituem, no entanto, o maior e mais contínuo esforço para uma maior segurança, principalmente referente à estabilidade, por isso é importante conhecer os mecanismos que atuam sobre os aterros sanitários, bem como os parâmetros que o caracterizam. Problemas envolvendo a deformabilidade de aterros sanitários são recorrentes e devido à sua característica complexa, o tema vem sendo amplamente abordado em congressos e palestras que têm geotecnia ambiental como tema central.

Segundo Simões (2000) os resíduos sólidos urbanos apresentam grandes recalques iniciais, associados à aplicação de sobrecargas, seguidos de um processo de deformação lenta sob carga constante, resultante do comportamento viscoso do resíduo e perda de massa devido aos processos de decomposição.

A magnitude e a variação do tempo de duração dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos 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 futuros contidos em projetos, realizados com base em métodos teóricos ou empíricos, que diversas vezes se distanciam das realidades encontradas na fase de operação dos empreendimentos. Dessa forma, a teoria probabilística desenvolvida por Laplace, Teoria de Bayes, se apresenta como uma alternativa, cruzando os resultados dos métodos clássicos, *a priori*, com os dados de aferição de instrumentos de monitoramento, “*verossimilhança*” e então obtenção de parâmetros atualizados, *a posteriori*.

## **Objetivo**

O objetivo principal desta pesquisa é contribuir para o estudo da estimativa dos recalques dos maciços de aterros sanitários, a partir da aplicação da teoria bayesiana a um estudo de caso, utilizando modelos de previsão de recalques existentes e dados do monitoramento do comportamento real.

Para atingir este objetivo, e como objetivos específicos, destacam-se:

- Análise das propostas disponíveis na literatura para previsão de recalque em maciços de resíduos sólidos urbanos;
- Seleção de aterro sanitário com instrumentos de monitoramento de recalques implantados e aferidos;
- Obtenção de parâmetros e tendências de acordo com os cenários apresentados nos casos;
- Comparação e avaliação dos resultados probabilísticos obtidos a partir da aplicação da Teoria de Bayes.

## **Motivação**

O autor tem interesse em geotecnia ambiental e o tema abrange uma série de conhecimentos da especialidade, pois o comportamento de maciços de resíduos

sólidos requer o conhecimento das características físicas e mecânicas dos componentes para a estimativa de compressibilidade do material ao longo do tempo. O estudo deste tema necessita, assim, do envolvimento com os principais assuntos da área de geotecnia. Destaca-se que o autor também tem interesse em se aprofundar em análise probabilística apresentada pela teoria bayesiana a fim de aplicá-la à geotecnia ambiental.

Além disso, outra indagação inerente ao autor é quanto à verificação, *in situ*, dos resultados obtidos nas aferições de recalques nas unidades de disposição de resíduos. O autor atuou em casos desta natureza e observou que o comportamento observado, em diferentes seções da obra, destoava significativamente das previsões clássicas realizadas na fase de projeto de recalques de aterros usuais.

Nos aterros sanitários o projeto costuma ser desenvolvido com um nível de incerteza grande em relação aos parâmetros e ao comportamento esperado das várias camadas de resíduos, além de outros fatores envolvidos nas análises. Dessa maneira, diante da possibilidade de avaliar a aleatoriedade das principais variáveis envolvidas nos modelos de cálculo empregados nas estimativas *a priori*, e à possível redução na incerteza destes parâmetros, com base no registro das informações aferidas *in loco*, motivou o autor à aplicação desta ferramenta na obtenção de uma estimativa *a posteriori*.

A disponibilidade de um amplo banco de dados referentes aos recalques aferidos no aterro em apreço possibilitou o desenvolvimento deste estudo. O autor teve a oportunidade de trabalhar nos projetos e nos acompanhamentos de implantação e/ou operação, de maneira que os registros foram disponibilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

Estas razões conduziram o autor ao tema da pesquisa, na expectativa de obter, com a qualidade dos dados disponíveis e as simplificações dos modelos usuais de cálculo, uma estimativa mais acurada da previsão do recalque quando comparada à simples aplicação dos métodos teóricos ou semiempíricos.

## **Estrutura da dissertação**

Após esta introdução apresenta-se, no Capítulo 1, uma revisão bibliográfica onde são destacados os conceitos básicos de resíduos sólidos urbanos, de aterros sanitários e de elementos que influenciam no comportamento e compressibilidade do maciço. Também são apresentados os instrumentos usualmente utilizados na aferição

*in loco* dos recalques ocorridos, denominados marcos superficiais. Seguidamente, são descritos alguns métodos clássicos utilizados na previsão de recalque em maciços de resíduos sólidos urbanos. A ferramenta proposta que consiste na aplicação da teoria Bayesiana ao estudo da confiabilidade da previsão de recalques é também descrita neste capítulo.

O Capítulo 2 resume o estudo de caso, apresentando a unidade, caracterizando a geologia, a pedologia, a estratigrafia típica e a instrumentação utilizada.

O Capítulo 3 consiste na estimativa *a priori* do recalque a partir dos métodos teóricos adotados e sua distribuição estatística em função da faixa de variação dos parâmetros necessários à análise.

O Capítulo 4 apresenta os dados referentes à função de verossimilhança, obtidos através da interpretação das aferições realizadas nos marcos superficiais implantados na unidade.

A atualização da previsão do recalque, *a posteriori*, com base nas estimativas *a priori* e na função de verossimilhança, é apresentada no Capítulo 5.

O Capítulo 6 compreende as interpretações gerais dos resultados calculados, verificando a qualidade das atualizações e comparando os valores obtidos para cada modelo supracitado.

Por fim, o Capítulo 7 resume as principais conclusões do estudo, bem como propõe algumas sugestões para trabalhos futuros neste tema.

## **1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo trata da revisão bibliográfica dos principais assuntos salientados na presente dissertação, contemplando características e composições dos resíduos sólidos urbanos (RSU), principais aspectos da implantação e operação de aterros de resíduos sólidos urbanos (ARSU), bem como metodologias de aferição e avaliação de recalques nesses empreendimentos. São ainda debatidos modelos teóricos e semiempíricos para previsão de recalque de maciços de resíduos sólidos e apresentados aspectos relativos à aplicabilidade da Teoria de Bayes na atualização dessas previsões.

### **1.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)**

Segundo a NBR 10.004 (1987) os resíduos sólidos urbanos compreendem apenas as parcelas geradas nos domicílios, nas repartições comerciais públicas e privadas, nas lojas e armazéns em geral, restaurantes, lanchonetes e similares, e na limpeza de ruas, avenidas, praças, parques, jardins e demais locais públicos. Dantas (2007) defende que os resíduos sólidos podem ser classificados como materiais heterogêneos (inertes, minerais e orgânicos), resultantes das atividades diárias do ser humano e da natureza, podendo ser parcialmente utilizados, gerando economia ambiental e proteção à saúde pública.

O Novo Marco Legal do Saneamento (lei nº 14.026/ 2020) identifica como resíduos sólidos: resíduos domésticos; resíduos originários de atividades comerciais, industriais e de serviços, em quantidade e qualidade similares às dos resíduos domésticos, que, por decisão do titular, sejam considerados resíduos sólidos urbanos, desde que tais resíduos não sejam de responsabilidade de seu gerador nos termos da norma legal ou administrativa, de decisão judicial ou de termo de ajustamento de conduta; e resíduos originários dos serviços públicos de limpeza urbana.

Em resumo, os resíduos sólidos urbanos são constituídos basicamente por matéria orgânica putrescível, papel, podas de vegetação, plásticos, vidro, material metálico, ossos e demais tipos de resíduos, denominados de material inerte, a depender da sua caracterização física ou gravimétrica.

Essas características dos resíduos sólidos urbanos estão fortemente condicionadas a fatores climáticos da região de origem e às características populacionais de densidade e condições sociais e econômicas.

Segundo Oliveira *et al.* (1998), os resíduos sólidos são resíduos que resultam de atividades humanas e que são lançados no ambiente. O termo lixo é usado para definir resíduos sólidos, porém da palavra lixo subentende-se algo imprestável, o que não é o caso dos resíduos sólidos, pois, a maioria, é material reaproveitável, com um potencial econômico agregado respeitável.

Os 5Rs da sustentabilidade atualmente preconizam a gestão integrada de resíduos e este gerenciamento integrado está relacionado ao conceito de uma atuação sistemática, abrangente e integrada do poder público e da sociedade civil, a partir do ciclo de vida dos resíduos, desde a geração, segregação, acondicionamento, identificação, coleta, manipulação, transporte, armazenamento e tratamento, até sua destinação final.

A destinação final é, dentre as dificuldades que se apresentam ao gerenciamento integrado dos RSU, a questão de maior importância. A carência de recursos técnicos, financeiros e humanos é uma realidade no país e os problemas de ordem técnica e operacional decorrentes dificultam a implementação de sistemas de gerenciamento integrado de RSU por parte dos municípios. A questão foi praticamente ignorada pelas administrações municipais durante muitos anos, quando os RSU em todo país eram dispostos em lixões a céu aberto, sem qualquer tipo de controle ou proteção ambiental, causando a proliferação de vetores de doenças, a contaminação dos solos e das águas superficiais e subterrâneas, além de problemas sociais relacionados a pessoas que passaram a viver em função do resíduo depositado nesses locais.

## **1.2 Tratamento de RSU**

### **1.2.1 Aspectos históricos**

De acordo com Worrel e Vesilind (2011), até o período da Revolução Industrial (1760-1840), não era dada nenhuma importância às condições sanitárias das cidades, em especial no que tange aos resíduos sólidos. Após a Revolução Industrial, quando foram introduzidos no lixo parcelas de embalagens, plásticos e demais industrializados, os resíduos passaram a ser mais debatidos, principalmente pelas questões envolvendo saúde. No entanto, ainda hoje, ao observar ao redor das cidades, percebe-se problemas recorrentes e diários ligados à má gestão desses resíduos. Mendez (2021) relata que em 2000, a ruptura de um lixão nas Filipinas

soterrou mais de 200 catadores. Bem como em 2010, uma área conhecida como Morro do Bumba (Rio de Janeiro), onde um lixão desativado havia se transformado em local de moradia de milhares de pessoas, colapsou depois da ocorrência de chuvas fortes, levando mais de 50 pessoas a óbito. Além dos diversos fatores que causam danos silenciosos e que estão constantemente em atuação envolvendo os resíduos no meio da sociedade.

Segundo relato de Mahler (2016, *apud*. Mendez, 2021), Roma fundada no século VIII a.C era dotada de sistema de esgoto sanitário e possuía a maior rede de estradas da época, no entanto, não era dotada de nenhum serviço de limpeza pública. A prática comum da época era o descarte indiscriminado do lixo.

Em Londres, 1354, foi publicado um edital normativo determinando que o lixo deveria ser removido da frente das casas semanalmente, mas o método comumente utilizado nesse caso era o descarte nos rios. Posteriormente, em 1407, os moradores foram instruídos a armazenarem o lixo no interior das residências até que fossem levados pelo coletor e essa forma de recolhimento permaneceu quase sem mudanças por séculos.

De acordo com Mendez (2021), a preocupação com o serviço formal de coleta de lixo no Brasil iniciou-se em 1880, quando o imperador à época, D. Pedro II assinou um Decreto aprovando contrato para irrigação e limpeza da capital do país, Rio de Janeiro. Os serviços consistiam basicamente no transporte dos resíduos através de carroças à tração animal e como destino tinham na baía de Guanabara. Já em 1936, passou-se a transportar resíduos em maior escala através de bondes para uma área de disposição no bairro do Caju. A disposição de lixo nesse local ocorreu por praticamente 40 anos, ocupando uma área de aproximadamente 800.000 m<sup>2</sup> e teve operação encerrada devido problemas ambientais gerados. Uma outra região passou a ser usada para destinação dos resíduos gerados na cidade do Rio de Janeiro em 1976, a região de Gramacho na Baixada Fluminense, aos fundos da Baía da Guanabara, constituindo assim o Lixão de Gramacho, com aprox. 1.300.000 m<sup>2</sup>, que foi utilizado até o ano de 2014 para destinação de resíduos, inicialmente como lixão e depois como aterro controlado após execução de medidas de engenharia na tentativa de redução dos impactos ambientais. Esta área até hoje é fonte de diversos estudos e pesquisas sobre o assunto.

Processo similar de reformulação ocorreu em São Paulo no Aterro Sanitário Bandeirantes, que iniciou suas atividades no ano de 1979 como lixão e parou de



receber resíduos em 2007, abrangendo uma área de 1.400.000 m<sup>2</sup>. Durante seus 28 anos de atividade recebeu os resíduos proveniente da cidade de São Paulo, passou por diversas etapas de melhoramento e se tornou fonte de estudos e pesquisas após ruptura ocorrida no início dos anos 90. Estima-se que com a instalação de uma usina de geração de energia no local, o Aterro deixou de emitir 190.000 toneladas de gás metano na atmosfera.

Segundo Mahler (2001), em meados do século XX, com o avanço da industrialização e elevação da vida média dos seres humanos, houve um aumento significativo da produção de resíduos, além da modificação das características dos mesmos. Loureiro (2005) afirma que componentes como embalagens *Tetra Pak*, fraldas descartáveis, latinhas de cervejas, PET, equipamentos de som, discos de vinil, televisores, jornais, revistas, pneus, baterias e pilhas fazem o resíduo moderno ser mais perigoso do que o resíduo gerado no período pré-revolução.

A análise histórica tanto da geração de resíduos (quantitativo) quanto da classificação e diferenciação dos tipos deles (qualitativo), resulta numa realidade preocupante, exigindo a ampliação de forma considerável dos estudos relacionados aos resíduos sólidos.

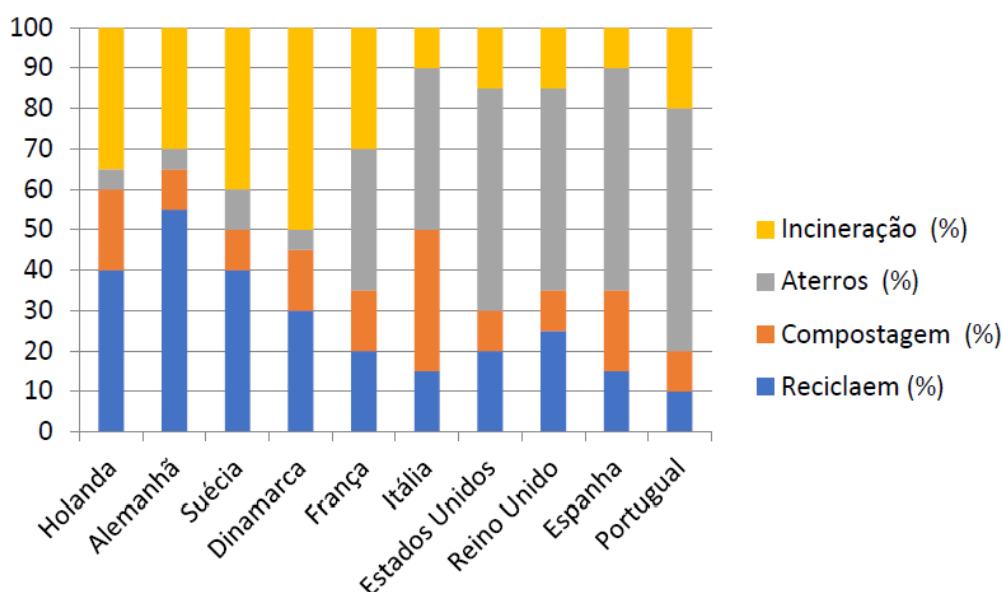
### 1.2.2 Políticas de Tratamentos de Resíduos

A gestão de resíduos sólidos não pode ser observada como uma questão meramente técnica e de engenharia, mas incluir aspecto como as questões sociais, econômicas, ambientais, políticas e a logística de transportes. A visão equivocada da gestão integrada de resíduos normalmente resulta em planos técnicos não realistas e distantes das condições locais ou que são cópias puras de planos de outros lugares.

As políticas públicas são a coordenação dos meios à disposição do Estado, harmonizando as atividades estatais e privadas para a realização dos objetivos socialmente ou economicamente relevantes e politicamente determinados. (BUCCI, 2002).

A União Europeia, composta por 28 países, tem como característica relevante a adoção de políticas conjuntas para todos os membros, assim, o que é decidido pelo grupo deve ser seguido por todos. Em relação à gestão dos Resíduos Sólidos, ela se apoia em Diretivas e assim, os países têm metas e prazos estabelecidos, porém cada um estipula a forma como vai integrá-la à sua realidade para cumpri-la. Esse grupo tem mostrado evolução nos modelos de gestão, no entanto há diferenças destacáveis

entre os países membros. Países do Norte da Europa como Suécia e Noruega, por exemplo, possuem um desenvolvimento bastante diferente de países como Portugal e Espanha. Essa diferença fica evidenciada ao observar a figura a seguir, que apresenta os percentuais de destinação dos resíduos nos países. Nela percebe-se que Holanda, Alemanha, Suécia e Dinamarca praticamente não destinam mais seus resíduos em Aterros, enquanto França, Itália, Reino Unido, Espanha e Portugal ainda utilizam essa técnica em larga escala, bem como Estados Unidos, que não pertence ao grupo, mas está apresentado na publicação.



**Figura 1 - Percentual de Destinação de resíduos em alguns países. Fonte: Revista em Discussão nº 5 (2014, *apud*. MENDEZ, 2021)**

Para mudança desse cenário, países que entram no grupo, como foi o caso de Portugal e Espanha, são beneficiados por um fundo de coesão para a melhoria da gestão de tratamento dos resíduos gerados em seus territórios. Essa medida visa a redução das pressões ambientais causadas por aterros.

Nos Estados Unidos, há uma atuação ativa da Agência de Proteção Ambiental (EPA) que estabelece os padrões nacionais gerais de gestão, monitoramento e fiscalização de resíduos sólidos, a serem cumpridos pelas Unidades. No país, no entanto, há diferenças regionais marcantes nas formas de tratamento e tecnologias empregadas nos resíduos. Enquanto a porção Leste concentra majoritariamente alternativas de disposição em aterros e incineração, na parcela Oeste, ocorre a priorização de medidas voltadas para a redução de resíduos e reciclagem de materiais.

O Japão, amplamente conhecido pelo desenvolvimento tecnológica, é também um dos líderes mundiais nas práticas ambientais de gestão e tratamento dos resíduos sólidos, visando melhoria da saúde coletiva a partir da eliminação dos resíduos irregulares e da limpeza dos logradouros. Nesse sentido, ocorreu em 1970, a promulgação da Lei de Gestão de Resíduos (*Waste Management Law*). O modelo de gestão de resíduos estabelecido no país é basicamente municipal, com estabelecimento de centros administrativos nas principais cidades para descentralização do gerenciamento dos resíduos. No entanto, observa-se uma considerável diversidade de métodos utilizados, com priorização de ações de coleta seletiva e aplicação de incineradores. Além disso, a elevada densidade populacional e o intensiva ocupação do solo não permitem a destinação de grandes áreas para aterros, dando ao país um dos maiores índices de reciclagem e incineração do mundo, além de instituir a Lei Fundamental do Ciclo de Vida dos Materiais (2002)<sup>1</sup>.

Na Tabela 1, apresentada no estudo de Maia *et al.* (2016) é exposto um resumo da forma como a gestão dos resíduos sólidos é desenvolvida em países da União Europeia e outros quatro, Estados Unidos, Japão, Canadá e Brasil. Observa-se que não há diferenças significativas no tocante a forma como as normativas são concebidas no meio social, no entanto, embora descritivamente semelhantes, as práticas não apresentam a mesma eficácia, pois nos países desenvolvidos a gestão dos resíduos sólidos é produto de um conjunto de medidas desenvolvidas com responsabilidade genuinamente social, econômica e ambiental.

**Tabela 1 – Gestão de RSU no Brasil e em alguns países desenvolvidos (MAIA *et al.*, 2016)**

| PAÍS           | FORMA DA LEGISLAÇÃO         | RESPONSABILIDADE DA GESTÃO DE RSU       | AÇÕES VOLTADAS À GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS                                                                                                                                                        |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Brasil         | Leis / Decretos/ Resoluções | Compartilhada sociedade, Poder Público. | entre indústria, Reduzir a produção de resíduos, Reutilizar e/ou Reciclar; Repensar atitudes que degradam o meio ambiente e Recusar produtos causadores de danos ao meio ambiente e à saúde humana. |
| União Europeia | Diretivas/ leis             | Compartilhada sociedade, Poder Público. | entre indústria, Evitar a produção de resíduos sólidos; praticar o reuso e/ ou a reciclagem de materiais; recuperar energia; aterrar os rejeitos.                                                   |

<sup>1</sup> Prevê que vendedores de equipamentos domésticos devem recolher os produtos em fim de vida útil e os fabricantes a reciclá-los.

| PAÍS           | FORMA DA LEGISLAÇÃO | RESPONSABILIDADE DA GESTÃO DE RSU                        | AÇÕES VOLTADAS À GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS                                                                                                                                                                      |
|----------------|---------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Estados Unidos | Leis                | Compartilhada entre sociedade, indústria, Poder Público. | Sistema "berço/ túmulo", implementação de ações voltadas a gestão dos resíduos sólidos, desde a geração até a disposição final. Compreende a redução, reutilização, reciclagem, disposição em aterro, incineração |
| Japão          | Leis                | Compartilhada entre sociedade, indústria, poder público. | Divisão de responsabilidades; Mecanismos econômicos; Implementação gradual das leis                                                                                                                               |
| Canadá         | Leis                | Compartilhada entre sociedade, indústria, Poder público. | Evitar a produção de resíduos sólidos; praticar o reuso e/ou a reciclagem de materiais; recuperar energia; aterrar os rejeitos                                                                                    |

O Brasil, por mais que legisle sobre o tema e conheça as diretrizes a seguir, caminha a passos lentos rumo à implementação da gestão. Deixando claro que não é importando políticas e tecnologias internacionais que se chegará a um desempenho de países desenvolvidos na questão dos Resíduos Sólidos. O país apresenta problemas complexos como corrupção, fiscalização ineficiente, falta de integração das políticas, entre outros.

A Política Ambiental nacional, tornou-se mais robusta e variada nos últimos anos, trazendo complexidade ao contexto legal e ao setor de Resíduos Sólidos Urbanos, os principais marcos legais foram a Lei de Consórcios Públicos (Lei 11.107/ 2005), a Política Nacional de Saneamento Básico - PNSB (Lei 11.445/ 2007) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (Lei 12.305/ 2010). Essa última, após mais de duas décadas sendo discutida no Congresso Nacional, preencheu uma importante lacuna na legislação ambiental do país. Segundo Maia *et al.* (2016), da mesma forma que em outros países, as ações relacionadas à gestão dos resíduos domiciliares são principalmente de competência dos municípios, estes têm autonomia administrativa definida em nossa Constituição. Assim, à lei federal cabe estabelecer as normas gerais, aplicáveis a todo o país, sem esgotar a possibilidade de haver legislação estadual suplementar.

Diversos instrumentos e princípios importantes foram trazidos pela PNRS na busca por colocar o Brasil em patamar similar aos países desenvolvidos, no entanto, equívocos são apontados por alguns autores como Ribeiro (2011), que alega que a ênfase nas questões científicas e tecnológicas foi deixada de lado, reduzindo o debate ao marketing dos interesses particulares e políticos.

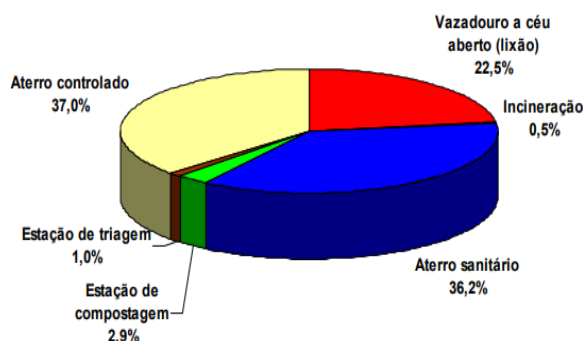
Essa Política Nacional define o aterro sanitário como alternativa econômica-social-ambiental mais adequada para o país, apesar de segundo Mahler *et al.* (2012)

os custos envolvidos nessa alternativa crescerem de forma linear ao longo do tempo. Ela prevê ainda uma estrutura de fiscalização e regulação por parte dos órgãos responsáveis nos Estados, além de uma integração entre os setores empresarial e público, situação ainda pouco vista no país.

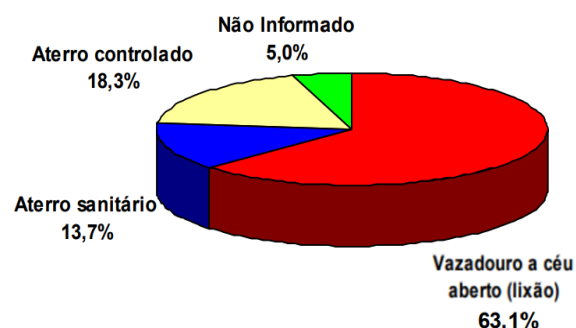
### 1.2.3 A situação dos resíduos no Brasil

Embora inadequados, os aterros controlados e os lixões foram por muito tempo as formas mais comuns de disposição de RSU no país. Nos aterros controlados os resíduos são cobertos com solo e eventualmente compactados, porém sem impermeabilização, drenagem e tratamento de chorume e gases. Os lixões são descargas a céu aberto, sem quaisquer medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Segundo Jucá (2004), a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB (IBGE, 2000) indicou uma situação favorável no que se refere à quantidade de resíduo vazado nas unidades de destinação final, pois aproximadamente 73,2% de todo resíduo coletado no Brasil estaria tendo um destino adequado, em aterros sanitários ou controlados. Porém, quando se analisa as informações tomando-se por base o número de municípios, o resultado já não é tão favorável, pois 63,1% deles informam que depositam seus resíduos em lixões e apenas 13,7% declaram que possuem aterros sanitários.

As figuras 2 e 3 apresentam a destinação final dos resíduos sólidos no Brasil, considerando o percentual por quantidade (em peso) dos resíduos e o percentual pelo número de municípios, apresentada por Jucá (2003) em um dos estudos pioneiros, mais completos e referência do setor.



**Figura 2 - Destinação final dos resíduos no Brasil, por quantidade de resíduos (JUCÁ, 2003).**



**Figura 3 - Destinação final dos resíduos no Brasil, por número de municípios (JUCÁ, 2003).**

A Figura 4 apresenta a evolução da destinação final dos resíduos no Brasil até os anos 2000, que indica o início de uma grande tendência pela busca de tratamento correto dos resíduos gerados.

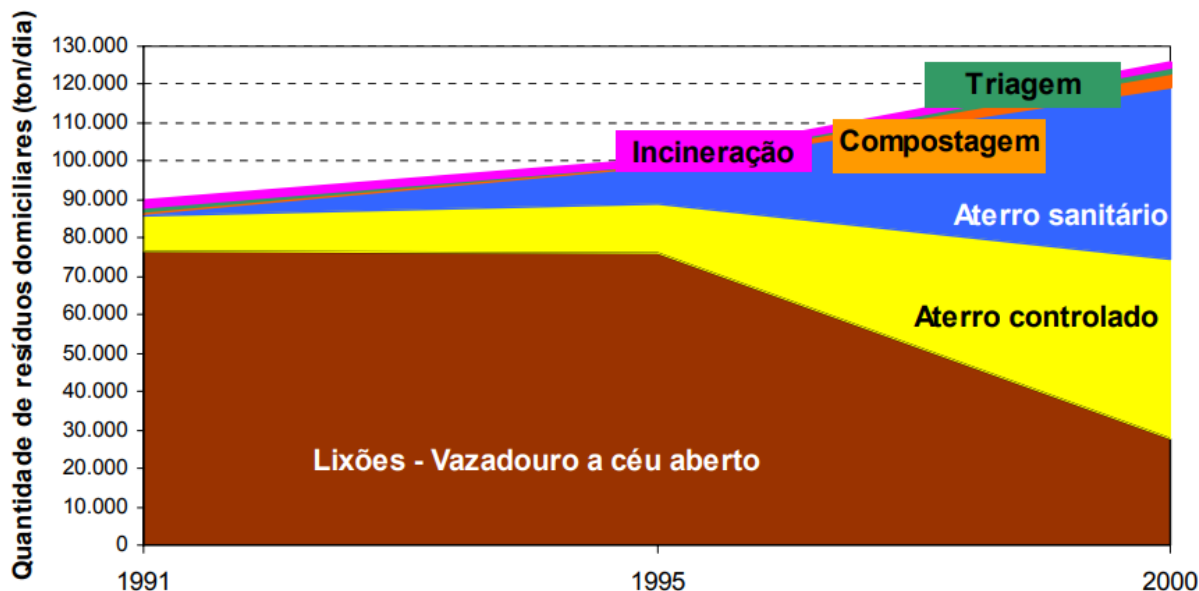


Figura 4 - Evolução da destinação final dos resíduos no Brasil (JUCÁ, 2003).

De acordo com a pesquisa realizada pelo IBGE em 2000, coletava-se diariamente no Brasil cerca de 228.413 toneladas de resíduos sólidos, sendo 125.258 toneladas referentes aos resíduos domiciliares. O valor médio dos resíduos domiciliares produzidos no Brasil era de 0,74 kg/hab./dia, destacando-se a região Norte com a menor taxa (0,58 kg/hab./dia) e a região Sudeste por possuir a maior taxa, correspondente à 1,3 kg por habitante por dia. Isso, de certa forma, reflete a influência do nível de desenvolvimento do local na produção de resíduos sólidos.

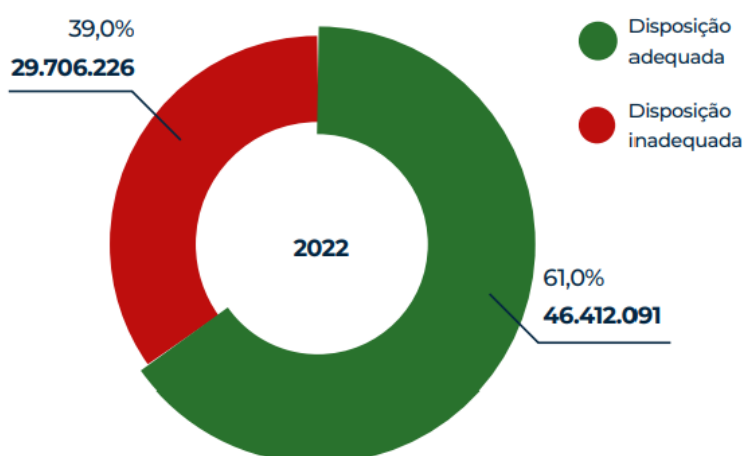
A Tabela 2 apresenta o cruzamento dos dados da população brasileira e sua distribuição regional, com a distribuição da geração total de resíduos entre as regiões do Brasil e a geração *per capita*. Em análise desses números, pode-se destacar a Região Sudeste com 42,6% da população brasileira, sendo responsável pela geração de 62% dos resíduos sólidos no país.

Tabela 2 - Geração de resíduos sólidos no Brasil (adaptado de JUCÁ, 2003).

| REGIÃO       | POPULAÇÃO TOTAL |        | GERAÇÃO DE RESÍDUOS (T/DIA) |        | GERAÇÃO PER CAPITA (KG/ HAB/DIA) |
|--------------|-----------------|--------|-----------------------------|--------|----------------------------------|
|              | QUANTIDADE      | %      | QUANTIDADE                  | %      |                                  |
| Brasil       | 169.799.170,00  | 100,00 | 228.413,00                  | 100,00 | 1,35                             |
| Centro-Oeste | 11.636.728,00   | 6,90   | 14.297,00                   | 6,30   | 1,23                             |

| REGIÃO   | POPULAÇÃO TOTAL |       | GERAÇÃO DE RESÍDUOS (T/DIA) |       | GERAÇÃO PER CAPITA (KG/ HAB/DIA) |
|----------|-----------------|-------|-----------------------------|-------|----------------------------------|
|          | QUANTIDADE      | %     | QUANTIDADE                  | %     |                                  |
| Nordeste | 47.741.711,00   | 28,10 | 41.568,00                   | 18,20 | 0,87                             |
| Norte    | 12.900.704,00   | 7,60  | 11.067,00                   | 4,80  | 0,86                             |
| Sudeste  | 72.412.411,00   | 42,60 | 141.617,00                  | 62,00 | 1,96                             |
| Sul      | 25.107.616,00   | 14,80 | 19.875,00                   | 8,70  | 0,79                             |

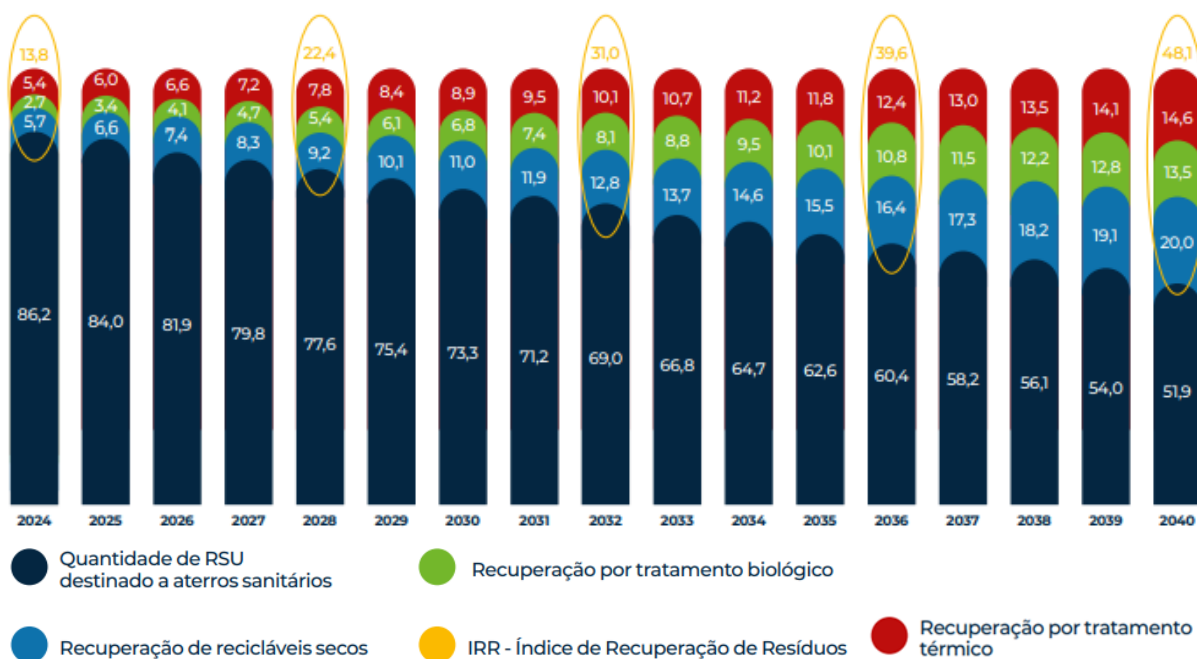
A PNSB (2008) indicou que, em 1989, aproximadamente 88% de todos resíduos coletados no país eram dispostos em lixões, 10% em aterros controlados e 1% em aterros sanitários. Em 2000, a quantidade de resíduos dispostos em lixões tinha caído para 72%. No mesmo ano, aproximadamente 22% dos resíduos eram destinados em aterros controlados e 17% em aterros sanitários. De acordo com o IBGE (2020), em 2008, os lixões ainda eram o destino de 50% dos resíduos sólidos, mas em contrapartida, a disposição em aterros sanitários subiu para 27,7%. Em 2022, segundo a ABRELPE (2022) o Brasil alcançou uma geração total de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de resíduos, o que corresponde a 224 mil toneladas diárias e 1,043 kg/hab./dia, e desses, 61% foi disposto em local adequado, enquanto 39% ainda tinha destinos irregulares como lixão ou aterros parcialmente controlados.



**Figura 5 - Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação, 2022 (ABRELPE, 2022).**

A PNRS (2010), atualizada em 2022, previa o fim de modalidades irregulares de disposição até 2024 no Brasil, no entanto, ao entrar no ano limite para esse encerramento, constata-se que o desafio ainda precisa ser superado. A política nacional estabeleceu ainda em sua última atualização as seguintes metas: i)

Eliminação de lixões e aterros controlados até 2024; ii) Recuperação da fração orgânica por meio de sistemas de tratamento biológico; iii) Recuperação da fração seca dos recicláveis por processos de reciclagem e iv) Recuperação e aproveitamento energético por meio do tratamento térmico.



**Figura 6 – Metas da PNRS por tipo de destinação final de RSU até 2040 (ABRELPE, 2022).**

O aperfeiçoamento de técnicas e cuidados na implantação, operação e monitoramento de aterros sanitários têm mostrado constante evolução e contribuição, rumo a construção de um cenário mais favorável. Atualmente há maior planejamento dos aterros de resíduos, em razão do contínuo desenvolvimento tecnológico e da crescente preocupação dos cidadãos com o meio ambiente. Segundo Boscov (2008), os impactos ambientais dos aterros sanitários são reduzidos pela escolha do local, seu projeto global, os componentes do sistema, qualidade dos materiais empregados, a operação, o monitoramento e o planejamento para o fechamento e pós-fechamento.

### 1.3 Aterros Sanitários

Segundo a NBR 13.896 (1997) – Projeto de aterro de resíduos não perigosos - aterros sanitários constituem uma forma de disposição de resíduos que, fundamentada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permite o confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública, minimizando os impactos ambientais.



Segundo Tchobanoglous *et al.* (1993), o processo de aterramento do resíduo é executado sob uma das três formas tradicionalmente empregadas: método da trincheira ou cava, método da depressão e método da superfície.

- Método da trincheira ou da cava: consiste na abertura de valas, onde o resíduo é disposto, compactado e posteriormente coberto com solo. A operação em vala pode ser manual ou com a entrada de equipamentos maiores em seu interior;

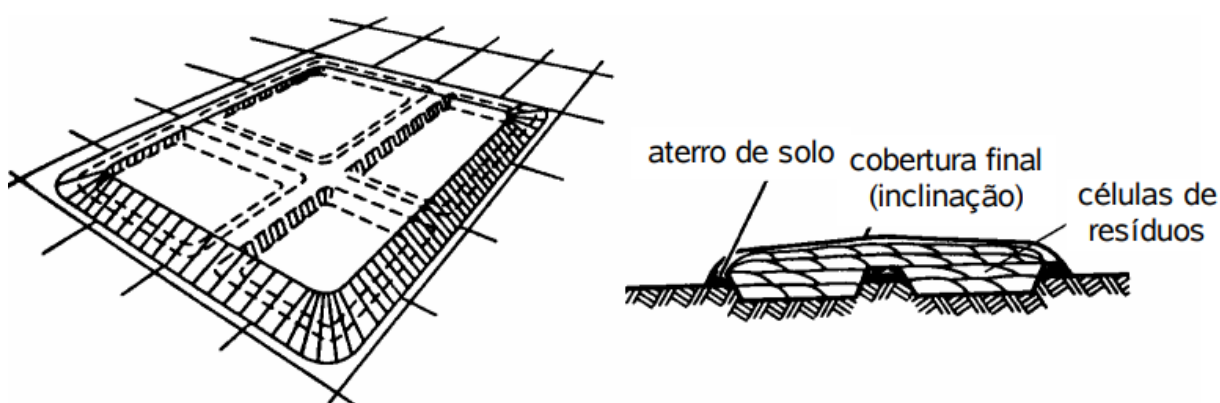


Figura 7 - Tipos de ARSU: Método da cava (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993).

- Método da depressão: também conhecido como da escavação progressiva, é fundamentado no aproveitamento de regiões de topografia acidentada, onde o resíduo é disposto e compactado pelo trator, regularizando platôs e posteriormente coberto com solo. É executado em áreas de meia encosta, onde o solo natural ofereça boas condições para ser escavado e, de preferência, possa ser utilizado como material de cobertura;

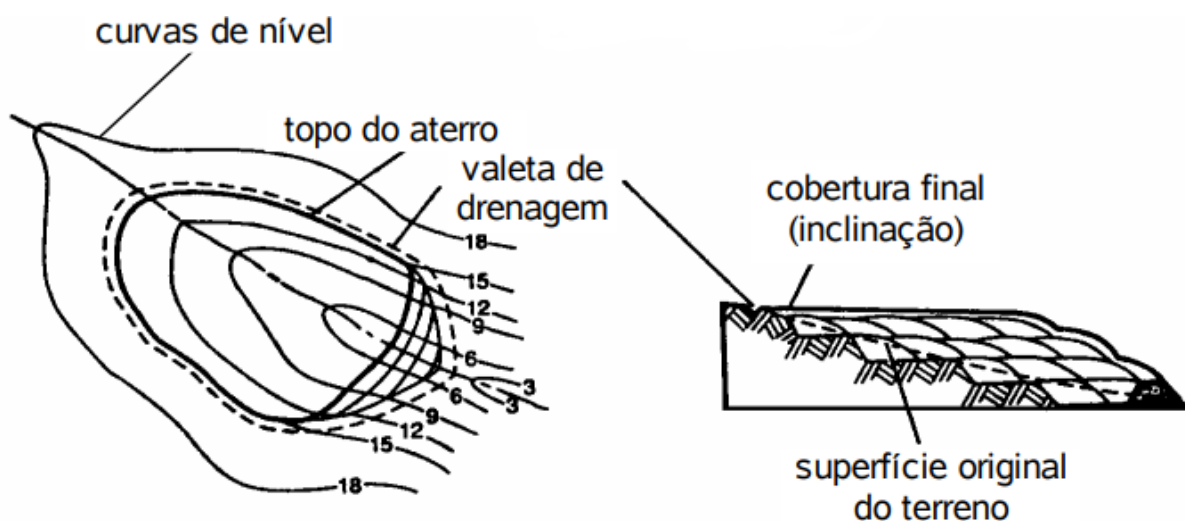
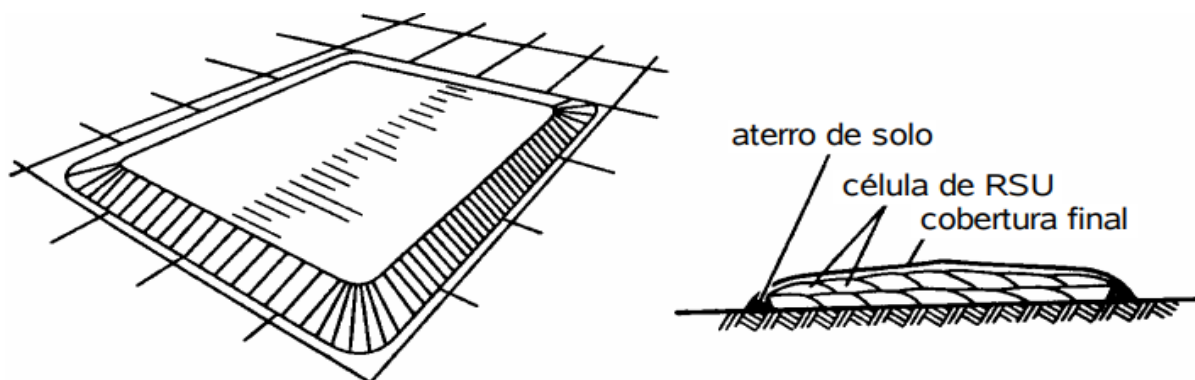


Figura 8 - Tipos de ARSU: Método da depressão (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993).

- Método da superfície: é empregado geralmente nos locais onde a topografia é plana e o lençol freático raso. Utiliza estrutura de aterro ao redor (dique de partida) para contenção dos resíduos.



**Figura 9 - Tipos de ARSU: Método da superfície (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993).**

Segundo Boscov e Abreu (2000), o conceito de aterro sanitário compreende um sistema devidamente preparado para a disposição dos resíduos sólidos urbanos, englobando, sempre que necessário determinados componentes e práticas operacionais, tais como: divisão de células, compactação dos resíduos, cobertura, sistema de impermeabilização, sistema de drenagem para líquidos e gases, tratamento de chorume, monitoramento geotécnico e ambiental, entre outros. Portanto, o termo aterro de resíduos refere-se à instalação completa e às atividades que nela se processam; ou seja, inclui o local, a massa de resíduos, as estruturas pertinentes e os sistemas de implantação, operação e monitoramento.

Aterros sanitários são obras recentes no campo de Geotecnia e apresentam uma particularidade: a própria obra constitui o empreendimento. Enquanto nas obras de engenharia convencionais é necessário o término da obra para o desempenho de suas funções, em aterros sanitários o empreendimento e a obra se confundem, e o término da obra corresponde ao término de sua função, embora ainda ocorram monitoramentos necessários e obrigatórios após encerramento das atividades na unidade.

Levando-se em consideração o volume de resíduos produzidos e a necessidade de áreas cada vez maiores para a disposição adequada deles, o estudo de metodologias para o projeto, implantação, operação e monitoramento de sistemas de disposição de RSU tem uma relevância extraordinária atualmente.

O conhecimento das questões relativas à caracterização, compactação, permeabilidade, resistência ao cisalhamento e compressibilidade dos RSU é de

fundamental importância para a previsão do comportamento real dos maciços sanitários, permitindo estimar com acurácia não só a vida útil dos aterros mas também a estabilidade dos maciços sanitários.

### 1.3.1 Aspectos da implantação de um aterro sanitário

Para a elaboração de projetos de aterros sanitários de RSU, adotam-se, no mínimo, as normas brasileiras NBR-13896/97, que estabelece critérios de projeto de aterros de resíduos não perigosos e NBR-8419/92, a qual fixa condições mínimas para a apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.

De acordo com as referidas Normas, o aterro sanitário, enquanto empreendimento projetado para receber e tratar os resíduos sólidos produzidos pelos habitantes de uma cidade, pelo período de mínimo de dez anos, e deve passar pelo processo de licenciamento ambiental, por meio do requerimento das Licenças Prévia (LP), de Instalação (LI) e de Operação (LO). Para os aterros de médio e grande porte (recebimento superior a 2000 t/dia) são exigidos um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), após concessão da LP; entretanto, esta exigência não é obrigatória para os aterros de pequeno porte, salvo quando o órgão ambiental competente verificar que o aterro proposto é potencialmente causador de significativa degradação do meio ambiente.

Quanto ao local de instalação, são preferíveis áreas afastadas de centros urbanos, considerando os custos com transporte, e que tenham facilidade de acesso para os transportes responsáveis pela coleta do lixo; terrenos amplos; áreas que tenham serviço de telefonia, água, transporte e energia elétrica e que apresentem posicionamento adequado em relação à direção dos ventos dominantes; locais no qual o solo é de baixa permeabilidade e que estão afastados de aeroportos ou de corredores de aproximação das aeronaves devido à presença de aves.

Além do licenciamento ambiental, a viabilidade de implantação e operação de aterros sanitários depende de uma série de aspectos, dentre os quais destacam-se:

- Proteção das águas superficiais e subterrâneas – distância mínima de 200m de curso d'água e 1,5m do lençol freático;
- Resguardar área de segurança aeroportuária – distância mínima de 10km para aeródromos;

- Preservação dos hábitos e costumes da população local - distância mínima de 1,5 km de núcleos populacionais;
- Disposição, acúmulo e compactação diária do RSU – mínimo 10 anos;
- Cobertura diária dos RSU – evitar vetores;
- Controle de gases e líquidos que são gerados no aterro;
- Manutenção do acesso interno e externo em boas condições;
- Restrição de acesso de pessoas e animais;
- Monitoramento das águas subterrâneas, da qualidade do chorume, do maciço dos resíduos sólidos que são dispostos no aterro e do sistema de drenagem superficial e dos gases.

Ao ser implantado um aterro sanitário, deve-se sempre ter em vista a importância das características do meio físico e sócio-econômico. Assim, o local escolhido deve atender alguns objetivos:

- Minimizar a possibilidade de existência de impactos ambientais negativos aos meios físico, biótico e antrópico.
- Minimizar os custos envolvidos.
- Minimizar a complexidade técnica para viabilização do aterro.
- Maximizar a aceitação pública, alinhando-se com interesses da comunidade.

Para que esses objetivos sejam atendidos, a implantação de aterros sanitários exige a elaboração de um projeto executivo, que deverá ser constituído do Memorial descritivo, Memorial técnico, Cronograma de execução e estimativa de custos, Apresentação de desenhos ou plantas e eventuais anexos.

Para implantação de um aterro sanitário é necessário estabelecer um roteiro de etapas que podem apresentar-se na seguinte ordem:

- Processo de seleção de áreas;
- Licenciamento;
- Projeto executivo;
- Implantação;
- Monitoramento.

De acordo com o INEA (2019), o Licenciamento Ambiental é o procedimento administrativo pelo qual o órgão competente licencia a localização, instalação, ampliação e a operação de empreendimentos e atividades que utilizem recursos

ambientais e sejam consideradas efetivas ou potencialmente poluidoras ou, ainda, daquelas que, sob qualquer forma ou intensidade, possam causar degradação ambiental, considerando as disposições gerais e regulamentares e as normas técnicas aplicáveis ao caso. Essa licença pode ser: Prévia (LP), de Instalação (LI), ou de Operação (LO).

Para projeto executivo, a NBR 8419 (1992) estabelece como elementos obrigatórios: memorial descritivo, memorial técnico, cronograma de execução e estimativa de custos, desenhos ou plantas de detalhamento, e eventuais anexos.

Tapahuasco (2009), por outro lado, listou sistemas que considera básicos de projeto para instalação de um aterro sanitário:

- I. Sistema de tratamento do fundo da base do aterro: camadas de solo compactado, geossintéticos (geomembranas – GM, ou geocomposto argiloso para barreira impermeável – GCL) ou, mais usualmente uma combinação destas são usadas com a função de proteger e impermeabilizar a fundação do aterro, evitando a contaminação do subsolo e aquíferos adjacentes devido à migração dos lixiviados e gases;
- II. Sistema de drenagem dos líquidos percolados: geralmente consiste em uma camada de material granular de alta permeabilidade, como brita, protegida por uma camada de filtração, geralmente de areia ou geotêxtil. Uma tubulação perfurada, de material física e quimicamente resistente ao tipo de resíduo disposto, usualmente PEAD (Polietileno de Alta Resistência), é colocada dentro da camada de material granular. As tubulações conduzem o percolado a um reservatório, de onde é direcionado para tratamento. A função do sistema de drenos é coletar e conduzir líquidos percolados, de forma a reduzir as pressões atuantes dos líquidos na massa dos resíduos aterrados;
- III. Sistema de drenagem de gases: dispositivos verticais que atravessam todo o perfil do aterro, desde o revestimento de fundo até a superfície do aterro, e são construídos com tubos perfurados envoltos por materiais granulares;
- IV. Sistemas de camadas de coberturas: tem como função proteger a superfície dos resíduos dispostos nas células de aterros sanitários e consiste na aplicação de solo sobre os resíduos, minimizando assim os impactos ao meio ambiente, visando a eliminação de vetores contaminadores, a diminuição da taxa de formação de percolados, a redução de odores e permitir o tráfego de veículos

operacionais, entre outros. A cobertura diária é realizada com camada de 0,30 a 0,50m ao término de cada jornada ou etapa de operação. Quando terminada a etapa de operação do aterro, deve ser aplicada a cobertura definitiva, que tem como função impedir a infiltração de água de chuvas e evitar a migração dos fluidos dos resíduos ao exterior do aterro. Pode estar constituído por uma série de camadas de solo juntamente com materiais geossintéticos e apresenta espessura entre 0,40 e 0,60m.

Diferente do que se pode imaginar, a etapa do monitoramento inicia-se ainda na implantação, quando os materiais que compõem os sistemas devem estar em perfeitas condições de funcionamento e adequados tecnicamente, permitindo que todo projeto tenha eficiência de acordo com o previsto. Esse monitoramento, que pode ser geotécnico ou ambiental, por sua vez, só se encerra muitos anos depois de encerradas as atividades de um aterro, tempo esse previsto nas legislações das diversas instâncias, federal, estadual e municipal.

### 1.3.2 Operação de um aterro sanitário

A operação de um aterro sanitário se dá com auxílio de máquinas, técnicas/procedimentos e visão estratégica, objetivando a correta compactação dos resíduos sólidos, e para isso, leva-se em consideração os diversos elementos envolvidos no processo.

- **Compactação de resíduos**

A compactação dos RSU pode se destacar como o principal parâmetro a ser controlado dentre os aspectos operacionais que envolvem a operação dos aterros sanitários, dada a sua importância, tanto no que se refere à otimização da disposição, quanto da melhoria de propriedades geomecânicas de resíduos. A compactação depende de inúmeros fatores, dentre eles: a espessura adotada nas camadas de resíduos, o tipo de compactador empregado no espalhamento e compactação dos resíduos (a seguir) e composição e condições dos resíduos dispostos (item 1.4).

A compactação de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários provoca a redução de volume que a massa de resíduos pode sofrer quando submetida a uma determinada pressão, geralmente aplicada por meio do emprego de equipamentos mecânicos, aumentando a estabilidade dos resíduos. A constante

deposição de camadas sobrepostas de resíduos e o processo de decomposição da matéria orgânica ao longo do tempo acabam por promover uma redução volumétrica do aterro e altera o seu comportamento geotécnico, principalmente em relação à sua estabilidade e aos possíveis recalques. Portanto, uma boa compactação garante, também, aos maciços de um aterro sanitário, condições estruturais e de estabilidade (CATAPRETA *et al.*, 2003).

As vantagens de uma boa compactação são caracterizadas por: aumento da vida útil dos aterros sanitários, redução da migração de gases e líquidos lixiviados, aumento da estabilidade do maciço de resíduos, a possibilidade de tráfego imediato de veículos sobre o maciço e melhorias no aspecto estético da massa de resíduos aterrada.

Marques *et al.* (2002) realizaram uma avaliação da compactação de resíduos sólidos urbanos, a partir de ensaios *in situ*, monitoramento e controle de um aterro experimental. Destacando que a compactação foi realizada com dois equipamentos distintos, fazendo variar parâmetros construtivos relacionados à espessura das camadas, número de passadas e à inclinação do plano de compactação.

Tchobanoglous *et al.* (1993) citam que a densidade inicial dos RSU dispostos em um aterro sanitário varia com o modo de operação e deposição, a facilidade de se compactar cada componente da massa de resíduos e a porcentagem de cada um destes componentes.

O peso específico dos RSU depende principalmente da composição gravimétrica (elevados teores de materiais leves ou putrescíveis acarretam menor peso específico), da distribuição granulométrica (resíduos triturados podem formar arranjos mais densos do que resíduos *in natura*) e do grau de compactação (resíduos compactados são mais densos do que resíduos soltos). A espessura da camada de cobertura diária também influencia a densidade dos RSU, pois se trata da aplicação de uma sobrecarga.

Gomes *et al.* (1997) relatam que o peso específico médio dos resíduos soltos varia entre 1,0 e 3,0 kN/m<sup>3</sup> e que após serem compactados pode variar de 7,0 a 9,0 kN/m<sup>3</sup>. Em função dos processos físicos e biológicos que ocorrem em um aterro sanitário, pode-se chegar, com o tempo, a valores de 10,0 a 13,0 kN/m<sup>3</sup>.

Denardin (2013) ressalta que a compactação de resíduos não tem sido bem estudada. Segundo a autora, devido a sua heterogeneidade, os resíduos podem ser altamente compactados e seu peso específico ser aumentado em até 30%. Ainda de

acordo com essa publicação, o peso específico dos RSU não compactados varia entre 2,5 kN/m<sup>3</sup> e 4,0 kN/m<sup>3</sup>, e compactado variando entre 4,5 kN/m<sup>3</sup> e 8,5 kN/m<sup>3</sup>.

Carvalho (1999) indica que na literatura encontram-se valores de peso específico de resíduos tão baixos quanto 1,2 kN/m<sup>3</sup>, em aterros mal compactados e com muito plástico, até valores de 17,0 kN/m<sup>3</sup> em aterros muito compactados.

#### - Espessura da camada de resíduos

Um fator de grande importância para se obter um maior peso específico é a espessura da camada de resíduos. Essas camadas devem ter espessura de não mais do que 0,60m. Quanto mais espessa for a camada, menor será a eficiência da compactação (CATAPRETA, 2008).

Em trabalho experimental, Marques *et al.* (2002) verificaram que a energia de compactação imposta às camadas compactadas, em termos do número de passadas do equipamento e da espessura das camadas, apresenta uma menor influência no valor do peso específico.

#### - Tipo de equipamento compactador

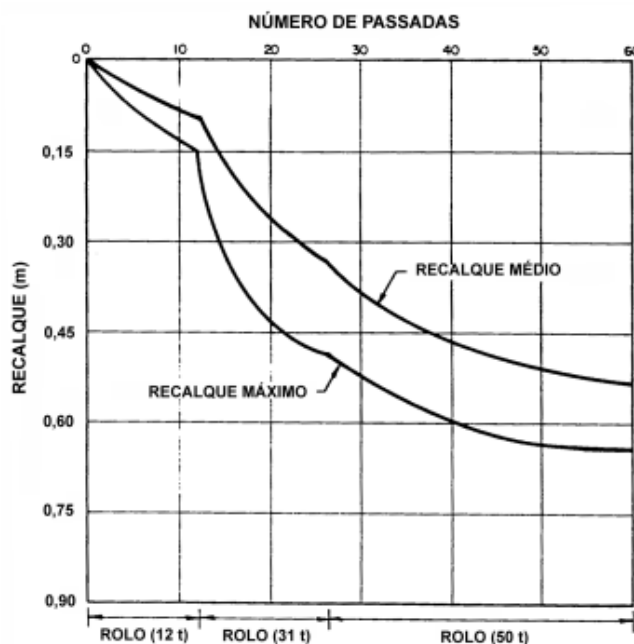
A compactação dos resíduos sólidos, realizada pelo tráfego de equipamentos de transporte e espalhamento (tratores de esteiras, mais empregado no Brasil) e por outros equipamentos específicos para este fim, representa o processo mais usual para densificação dos resíduos empregados em aterros sanitários. No entanto, o resultado desse processo de compactação, depende diretamente do tipo e peso desses equipamentos empregados.

Maiores densidades implicam, por um lado, volumes adicionais de disposição e conseqüentemente maior vida útil para os aterros, e por outro, maiores resistências, melhorando assim a estabilidade dos maciços. Além disto, o processo de densificação resulta em menores assentamentos, importante aspecto para integridade dos sistemas de drenagem e de recobrimento.

No tocante à estabilidade de aterros sanitários, o aumento da rigidez dos resíduos, traduzida, por exemplo, pela maior compactação deles, conduz a maiores fatores de segurança, ou de outra forma, possibilita com igual segurança operar aterros com alturas mais elevadas. Oweis e Khera (1986) recomendam a aplicação gradual de equipamentos de compactação (pesos operacionais e número de



passadas), para obtenção da máxima eficiência do processo, em termos da antecipação dos recalques esperados, conforme ilustrado na Figura 10.



**Figura 10 - Efeito da compactação nos recalques de aterros sanitários (OWEIS E KHERA, 1986).**

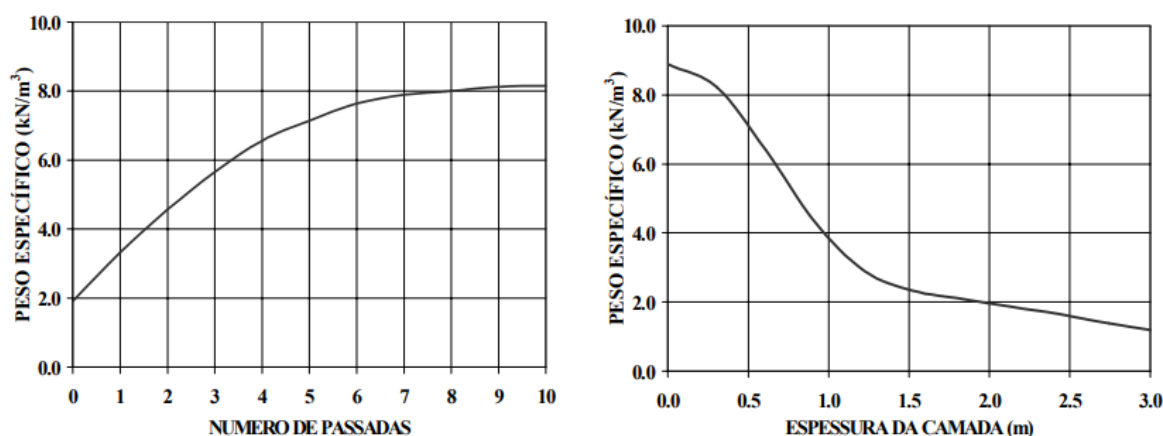
O processo de compactação passou por uma grande evolução nos últimos anos, graças ao desenvolvimento de equipamentos mais eficientes, que permitem obter elevados graus de compactação. Atualmente encontram-se disponíveis no mercado, compactadores com carga (peso) operacional entre 220 e 450 kN. A obtenção de elevados graus de compactação permite ainda minimizar o espalhamento dos resíduos pela ação do vento; reduzir o risco de incêndio; limitar a migração dos percolados e gases e reduzir a espessura das camadas de recobrimento diárias.

A seleção dos equipamentos deve levar em conta quatro aspectos principais: a vida útil esperada para o aterro, a demanda e a composição dos resíduos, a quantidade e características do material de recobrimento e o método de disposição e exigências quanto à densidade final requerida. Ressalte-se que o emprego econômico dos equipamentos é função direta da demanda diária de resíduos, sendo recomendados equipamentos de 220 kN para demandas de até 700 t/dia, de 340 kN para demandas de até 1.200 t/dia e de 450 kN para demandas superiores a 1.500 t/dia.

Usualmente são realizadas de 4 a 6 passadas com equipamentos pesados de rodas que promovam um alto grau de compactação. Embora o número de passadas

de 4 a 6 vezes proporcione uma maior compactação, o retorno obtido para este número adicional de passadas diminui substancialmente acima de 6 passadas. Neste sentido, um estudo desenvolvido por Schomaker (1972) apresenta a influência número de passadas e espessura das camadas no peso específico final dos resíduos. Este estudo se torna de difícil aplicação prática devido à ausência de detalhes à cerca dos elementos utilizados no processo, como composição e teor de umidade do resíduo e características do equipamento utilizado na compactação, no entanto, apresenta importantes conceitos relativos à compactação e aos recalques de resíduos sólidos urbanos, destacando:

- I. Devido às suas propriedades físicas, os resíduos sólidos são menos receptivos à compactação vibratória do que os solos;
- II. O número de passadas ideal depende da composição e teor de umidade dos resíduos;
- III. Os recalques em aterros sanitários estão extremamente associados ao teor de umidade dos resíduos, sendo observadas menores taxas de recalque em baixas umidades;
- IV. A magnitude e taxa de recalques de um aterro sanitário são fortemente influenciadas pela forma de construção do maciço (técnicas utilizadas, tempo e ritmo de construção).



**Figura 11 - Relação entre o peso específico dos resíduos, o número de passadas do compactador e a espessura das camadas (SCHOMAKER, 1972).**

Outro aspecto operacional importante, relacionado ao uso do maquinário compactador é a adequada inclinação das rampas de compactação de RSU, que tem sido indicada pela literatura e reforçada para prática diária como adequada a inclinação na ordem de 1V:2H a 1V:3H.

#### 1.4 Caracterização de maciços de resíduos sólidos urbanos

Maciços sanitários, diferente de maciços terrosos, são constituídos por materiais bastante heterogêneos, com diferentes origens e composições, a maior parte deles exposta a processos de biodegradação, os quais variam as propriedades e os comportamentos mecânicos destes maciços. Neste sentido, a investigação e caracterização destes materiais apresenta-se como fator de elevada importância para todas as fases de vida dos aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, desde as previsões de projeto até o monitoramento.

Manassero *et al.* (1996) defende, no entanto, que caracterizar as propriedades físicas e mecânicas dos resíduos sólidos é uma tarefa difícil devido alguns fatores:

- Insuficiência de procedimentos normatizados e generalizados para amostragem e execução de ensaios com resíduos sólidos;
- Elevada heterogeneidade e composição gravimétrica dos materiais;
- Dificuldade de obtenção de amostras com dimensões representativas das condições *in situ*;
- Alteração significativa das propriedades do material ao longo do tempo;
- Insuficiência de equipes treinadas e aptas no campo para a correta interpretação das leituras e procedimentos da investigação necessária/proposta.

Face a necessidade de se caminhar às margens dos conceitos previamente estabelecidos para os solos, é proposta uma classificação para os resíduos sólidos em dois grupos, procurando considerar a possibilidade ou não de aplicação das teorias da mecânica dos solos para análise de seu comportamento. Desta forma, um grupo trata os resíduos semelhantes à solo (*soil-like waste*) para os quais são válidos ou podem ser satisfatoriamente aplicáveis os procedimentos e teorias da mecânica dos solos, e o outro, refere-se aos resíduos não semelhantes à solo (*non soil-like waste*), onde tais princípios não podem ser aplicados ou o podem com severas limitações. De acordo com esta classificação, os RSU estão representados no segundo grupo, apresentando, portanto, limitações quanto à aplicabilidade das referidas teorias.

Ademais, as principais propriedades mecânicas do RSU as quais se objetiva conhecer, a saber, resistência ao cisalhamento e compressibilidade, são fortemente

influenciadas pela composição e estado de decomposição/ biodegradação do resíduo, bem como pelo comportamento de cada componente. No entanto, as informações sobre essas propriedades (composição, teor de umidade, peso específico, distribuição granulométrica) são escassas e, em alguns casos, os dados publicados são contraditórios, tornando todo processo de caracterização bastante dinâmico e desafiador. Desta forma, os procedimentos de amostragem e de investigações *in situ* e laboratoriais assumem importante papel na caracterização do material.

O que se observa, geralmente, são as propriedades mecânicas dos resíduos sendo avaliadas a partir de métodos convencionais de ensaios, de campo e de laboratório, da Mecânica dos Solos.

#### 1.4.1 Propriedades físicas

- Composição gravimétrica e granulométrica

A composição dos resíduos sólidos urbanos é extremamente heterogênea e dependente dos processos físico-químicos e de biodegradação atuantes. Diversos autores já relataram as variações significativas na composição dos resíduos, em diferentes países e localidades, as quais podem ser visualizadas na Tabela 3. Independente da localidade, as parcelas correspondentes à matéria orgânica e aos papéis e papelões apresentam-se com destaque em todas as composições, à semelhança da categoria “outros resíduos”.

**Tabela 3 - Composição de RSU para diferentes localidades (adaptada de BOUAZZA *et al.*, 1996)**

| TIPO                   | LOCAL |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |        |
|------------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|--------|
|                        | (1)   | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12)   |
| Metal                  | 1     | 1   | 3   | 3   | 5   | 2   | 2,5 | 4   | 1   | 3    | 3    | 6-15   |
| Papel                  | 25    | 5   | 12  | 3   | 22  | 10  | 31  | 19  | 25  | 16   | 15   | 20-55  |
| Plástico               | 0     | 1   | 5   | 0   | 0   | 3   | 9,5 | 7   | 3   | 20   | 14   | 2-15   |
| Couro, mad. e borracha | 7     | 1   | 0   | 7   | 3   | 6   | 4   | 4   | 1   | 0    | 3    | 0,4-15 |
| Tecido                 | 3     | 0   | 0   | 10  | 0   | 3   | 5   | 0   | 0   | 0    | 2    | 0-4    |
| Orgânico               | 44    | 45  | 74  | 15  | 20  | 61  | 28  | 59  | 71  | 58   | 58   | 9-62   |
| Vidro                  | 0     | 1   | 4   | 10  | 6   | 1   | 9   | 2   | 1   | 2    | 3    | 2-5    |
| Outros                 | 6     | 46  | 2   | 22  | 46  | 14  | 11  | 5   | 21  | 1    | 2    | 0      |

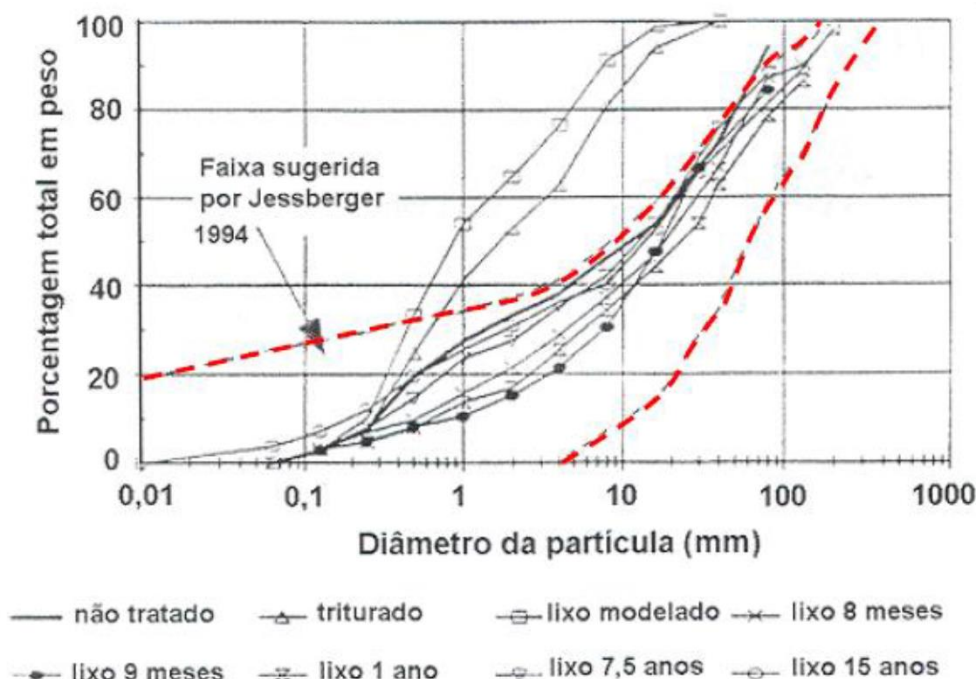
(1) Bangkok (TH); (2) Beijing (CN); (3) Nairobi (KN); (4) Hong Kong (HK); (5) New York (US); (6) Istambul (TK); (7) Genebra (CH); (8) Atenas (GR); (9) Cochabamba (BO); (10) Wollangong (AU); (11) São Paulo (BR); (12) Vários (CA)

Quanto às dimensões das partículas, a utilização dos procedimentos da mecânica dos solos (curvas granulométricas) para os resíduos sólidos urbanos, reveste-se de elevada dificuldade. Neste sentido, recorre-se para a caracterização dos resíduos, a determinação de uma curva de gradação (dimensões) das partículas, a partir de sua equivalência com a dimensão das aberturas das peneiras de ensaio, resultando em curvas similares às obtidas para solos. A Figura 12 apresenta os resultados de distribuições de dimensões de partículas para resíduos de diferentes idades resumida por Jessberger (1994).

Registra-se a tendência de uma maior quantidade de material fino, com a evolução da idade dos resíduos, face aos diferentes estágios de decomposição a que estão submetidos os mesmos. Considerando a heterogeneidade dos resíduos, a dimensão de suas partículas geralmente se estende por faixas amplas, sendo a distribuição típica resultante, muito próxima à dos cascalhos, com menos de 20% de finos (inferior a 75  $\mu\text{m}$ ).

Autores como Gabr e Valero (1995) e Carvalho (1999) propuseram a utilização de procedimentos similares para a caracterização da distribuição de dimensões de partículas dos resíduos. Carvalho (1999), por exemplo, amostrando e caracterizando resíduos com idade superior a 10 anos no Aterro Bandeirantes, em São Paulo, observou que as dimensões dos componentes dos resíduos situam-se em uma faixa entre 0,6mm e 100mm, sendo que cerca de 65% do material apresenta partículas menores que 30mm. Castro (1996) caracterizou os resíduos sólidos urbanos coletados (estado fresco) na cidade de São Paulo, em termos da dimensão básica das partículas, obtendo como distribuição média: 7,4% do material com dimensões superiores a 100mm; 28,9% com dimensões entre 50mm e 100mm; e 63,7% com dimensões inferiores a 50mm.

Face a heterogeneidade exposta, os parâmetros geotécnicos para os resíduos sólidos urbanos registrados na literatura especializada apresentam elevada dispersão, apontando muitas vezes para inconsistências. Isso se explica por essa grande variação na composição dos resíduos, além das diversas condicionantes que afetam as propriedades dos mesmos. Desta forma, deve-se sempre ter em consideração as condições de contorno em que foram obtidos os parâmetros apresentados.



**Figura 12 - Distribuição das dimensões de partículas de RSU em diferentes idades (DE LAMARE NETO, 2004 *apud*. COSTA, 2013).**

- **Peso específico**

O peso específico dos resíduos em aterros sanitários depende de uma série de fatores, podendo-se destacar: composição, método de lançamento, compactação, degradação com o tempo e adensamento por sobreposição de mais camadas.

A determinação *in situ* do peso específico dos resíduos é tarefa de difícil, podendo ainda apresentar elevada dispersão de resultados. Vários métodos, no entanto, têm sido utilizados, dos quais o mais simples e confiável consiste na escavação de um poço ou trincheira, com a pesagem do material e determinação do volume a partir do preenchimento da cava, devidamente impermeabilizada com manta sintética. A desvantagem desta técnica diz respeito à pequena faixa possível de obtenção de resultados, limitada a profundidades de cerca de 4,0m, além da impossibilidade de separar eventuais camadas de cobertura inseridas na vala de ensaio. Gachet *et al.*, (1998) avaliaram a utilização de métodos não destrutivos, geofísicos e gravimétricos, e ensaios *in situ* de densímetro nuclear, concluindo, após a análise dos resultados e dos procedimentos e custos envolvidos, pela maior factibilidade dos métodos de determinação direta, ou seja, através da medida de pesos e volumes em cavas ou trincheiras escavadas. Os autores apontam ainda que, com relação a utilização de densímetros nucleares, poucos relatos de aplicação e

sucesso encontram-se disponíveis na literatura, face a representatividade e incertezas envolvidas com a utilização desta técnica.

Oweis e Khera (1986), por sua vez, apresentam um procedimento para determinação indireta do peso específico médio para os resíduos de um aterro sanitário, tendo por base o conhecimento das pressões de pré-adensamento e pressões neutras geradas na fundação. Tal estimativa pode ser aplicada aos casos onde os solos de fundação (argilas) apresentam comportamento normalmente consolidado antes da execução do aterro e o nível piezométrico da fundação nos pontos ensaiados sejam conhecidos.

A Tabela 4 apresenta valores médios para o peso específico de resíduos obtidos por diversos autores. Já a Tabela 5 apresenta uma síntese de valores de peso específico, em função do grau de compactação, obtidos da literatura e sistematizados por Gachet *et al.* (1998). Observa-se da análise dessa última tabela, a importância da compactação para o aumento dos valores da densidade *in situ* do resíduo.

**Tabela 4 – Pesos específicos para RSU por diversos autores (adaptada de COSTA, 2013)**

| REFERÊNCIA                    | PESO ESPECÍFICO (kN/m³) | COMPACIDADE                      |
|-------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| MERZ E STONE (1962)           | 2,20 a 2,70             | RSU não compactado               |
| SOWERS (1968)                 | 4,70 a 9,40             | RSU bem compactado               |
| SCHOMAKER (1972)              | 2,90                    | RSU não compactado               |
|                               | 4,70 a 5,90             | RSU medianamente compactado      |
|                               | 8,80                    | RSU bem compactado               |
| BROMWELL (1978)               | 3,10                    | RSU não compactado               |
|                               | 6,20                    | RSU medianamente compactado      |
|                               | 9,30                    | RSU bem compactado               |
| HAM <i>et al.</i> (1978)      | 6,60                    | RSU bem compactado               |
| SARGUNAN <i>et al.</i> (1986) | 5,50 a 6,90             | RSU pouco compactado             |
| LANDVA E CLARK (1986)         | 6,80 a 16,20            | RSU bem compactado               |
| WATTS E CHARLES (1990)        | 5,40 a 8,00             | RSU bem compactado               |
| OWEIS E KHERA (1990)          | 6,30 a 9,400            | RSU compactado                   |
| SHARMA <i>et al.</i> (1990)   | 7,2                     | RSU (sem relato de compactidade) |
| GALANTE <i>et al.</i> (1991)  | 9,90 a 10,90            | RSU pouco compactado             |

| REFERÊNCIA                                             | PESO ESPECÍFICO (kN/m³) | COMPACIDADE                                                              |
|--------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| RICHARDSON E REYNOLDS (1991)                           | 15,00                   | RSU (sem relato de compactidade)                                         |
| FASSETT <i>et al.</i> (1994)                           | 3,00 a 9,00             | RSU pouco compactado                                                     |
|                                                        | 5,00 a 8,00             | RSU medianamente compactado                                              |
|                                                        | 9,00 a 10,50            | RSU bem compactado                                                       |
| VAN IMPE ( <i>apud</i> MANASSERO <i>et al.</i> , 1996) | 5,00                    | Resíduos de papel lançados                                               |
|                                                        | 8,00                    | Resíduos de papel triturados e compactados                               |
|                                                        | 10,00                   | RSU bem compactado (compactação dinâmica)                                |
| ZORNBERG <i>et al.</i> (1999)                          | 10,00 a 15,00           | RSU (sem relato de compactidade)                                         |
| SARSBY (2000)                                          | 1,2 a 3,0               | Resíduo lançado no aterro                                                |
| KAVAZANJIAN (2001)                                     | 10,0 – 20,0             | RSU (sem relato sobre a compactidade)                                    |
| CATA PRETA <i>et al.</i> (2005)                        | 7,0 – 11,0              | Resíduo de aterro sanitário (sem relato sobre a compactidade)            |
| BAUER (2006)                                           | 8,6 -15,6               | Aterro com resíduos degradados (sem relato sobre a compactidade)         |
| OCHS E SHANE (2006)                                    | 7,35                    | Resíduo fresco, população baixa renda (sem relato sobre a compactidade)  |
|                                                        | 4,9                     | Resíduo fresco, população classe média (sem relato sobre a compactidade) |
|                                                        | 1,96                    | Resíduo fresco, população classe alta (sem relato sobre a compactidade)  |

**Tabela 5 - Peso específico em função do grau de compactação (adaptada de GACHET *et al.*, 1998)**

| <b>G. COMPAC.</b><br><b>PARÂMETRO</b> | <b>NULO (%)</b> | <b>LEVE (%)</b> | <b>MÉDIO (%)</b> | <b>ELEVADO (%)</b> | <b>NÃO ESPEC. (%)</b> |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------------|-----------------------|
| N                                     | 27,00           | 11,00           | 14,00            | 22,00              | 119,00                |
| Mínimo (min)                          | 1,00            | 2,40            | 3,50             | 2,50               | 1,00                  |
| Máximo (máx.)                         | 8,00            | 6,50            | 7,70             | 12,00              | 17,30                 |
| Médio (m)                             | 3,60            | 3,90            | 5,20             | 8,40               | 7,40                  |
| $\sigma$                              | 2,20            | 1,40            | 1,20             | 2,40               | 4,00                  |
| CV (%)                                | 60,00           | 36,00           | 24,00            | 29,00              | 54,00                 |

Nulo: estado do resíduo após simples lançamento; leve: estado após passagem de caminhões coletores; médio: estado após passagem de compactadores; elevado: estado após várias passadas dos compactadores; N: número de registros obtidos;  $\sigma$ : desvio padrão; CV: coeficiente de variação ( $\sigma/m$ )



O peso específico dos resíduos geralmente aumenta com a profundidade, como resultado dos processos de adensamento e compressão do maciço sob efeito das cargas sobrejacentes, conforme ilustrado na Figura 13.

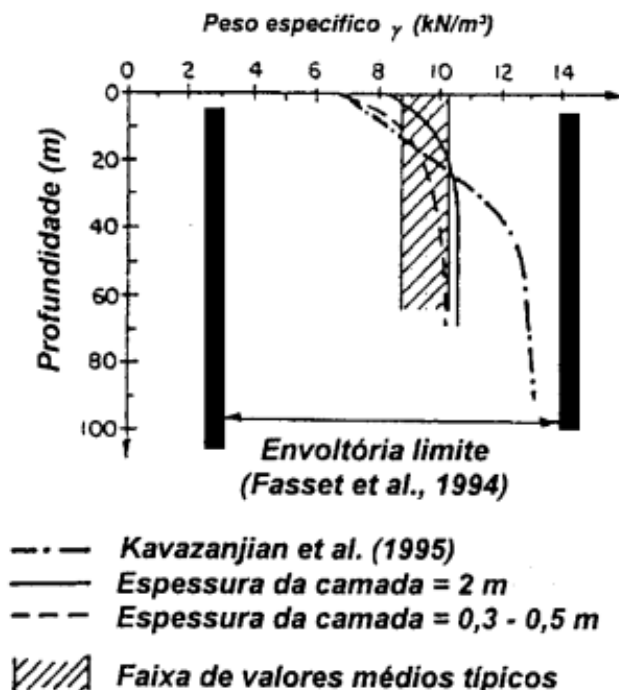


Figura 13 - Variação do peso específico de RSU com a profundidade (KNOCHENMUS et al., 1998).

Decorre deste fato, que os resíduos situados abaixo de uma determinada profundidade, entre 10,0m e 20,0m, e que apresentavam à época do lançamento reduzido grau de compactação, podem atingir uma condição comparável à de camadas inicialmente bem compactadas.

Kavazanjian et al. (1995) também apresentam resultados para o peso específico de resíduos sólidos em profundidade, obtidos a partir da utilização da técnica SASW (*Spectral Analysis of Surface Wave*) em aterros sanitários na Califórnia (EUA). Valores próximos de 10,0 kN/m<sup>3</sup> na superfície e 15,0 kN/m<sup>3</sup> a cerca de 60,0m de profundidade, foram registrados pelos autores. Foi observado pequeno acréscimo no peso específico entre as profundidades de 40,0 e 45,0m.

A variação do peso específico com a profundidade para resíduos novos e antigos foi igualmente apresentada por Oweis e Khera (1986). Os valores foram obtidos através da amostragem de resíduos em perfurações realizadas em aterro sanitário localizado na Califórnia (EUA).

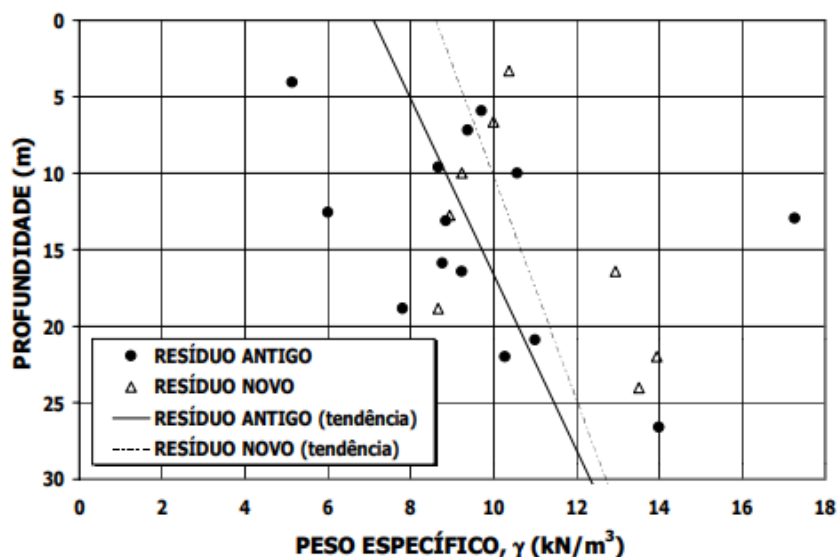


Figura 14 - Variação do peso específico com a profundidade (OWEIS E KHERA, 1986)

Nesses, os resultados para pesos específicos, indicaram:

- I. Aumento do peso específico com a profundidade;
- II. Valores para o peso específico dos resíduos novos ligeiramente superiores aos dos resíduos antigos, face a presença de maior umidade nos primeiros.

O aumento do peso específico dos resíduos devido ao efeito de sobreposição de camadas também tem importância, na medida que auxilia a estimativa da quantidade de resíduo que pode ser disposta no aterro até sua capacidade limite e a determinação da parcela de recalque a esperar após o encerramento do aterro sanitário.

- Teor de umidade

Segundo a Caterpillar (2000), outro aspecto a ser analisado leva em consideração a umidade e a condutividade hidráulica dos resíduos.

O teor de umidade dos resíduos varia com a composição inicial dos mesmos, com as condições climáticas locais, com as operações de lançamento e disposição e com a capacidade e desempenho dos sistemas de drenagem interna dos líquidos percolados, sendo um importante parâmetro para a estimativa das velocidades de modificações biológicas e para a previsão do potencial de geração de líquidos percolados e gases, além de indiretamente estar associada à geração de pressões neutras no interior do maciço. Segundo Landva e Clark (1990), em geral, o teor de umidade aumenta com o acréscimo da quantidade de matéria orgânica presente e os mecanismos de retenção de umidade na massa de resíduos sólidos urbanos. Podem

ser classificados como umidade no interior das partículas sólidas, umidade entre partículas, sustentada por tensões capilares ou umidade entre partículas, retida por camadas de baixa condutividade hidráulica.

O teor de umidade de resíduos sólidos ( $w$ ) pode ser expresso em relação ao peso úmido ( $W_w$ ):

$$W_w = \frac{(W_0 - W_1)}{W_0} \quad \text{Equação 1.1}$$

Ou ao peso seco ( $w_d$ ):

$$W_d = \frac{(W_0 - W_1)}{W_1} \quad \text{Equação 1.2}$$

onde:

$W_0$  = Peso inicial da amostra;

$W_1$  = Peso da amostra após secagem à temperatura de 60° C.

Ainda segundo Caterpillar (2000), a umidade ideal para uma melhor compactação é de aproximadamente 10%. Testes de campo, no entanto, mostram que, dependendo da época do ano, dos procedimentos de coleta e da composição dos resíduos, o teor de umidade tem grande variação, podendo ir de 10 a 80%.

Nos estudos desenvolvidos em um aterro experimental, Marques *et al.* (2002), concluíram que a relação entre o teor de umidade e o peso específico seco obtido para os resíduos sólidos urbanos indicam uma tendência, como esperado, de diminuição da permeabilidade com o aumento do peso específico dos resíduos.

A Tabela 6 apresenta faixas e valores de umidade obtidos para os resíduos de alguns aterros sanitários, compiladas por Marques (2001). No geral, os valores apresentados mostram uma tendência de acréscimo dos teores de umidade com o aumento da profundidade.

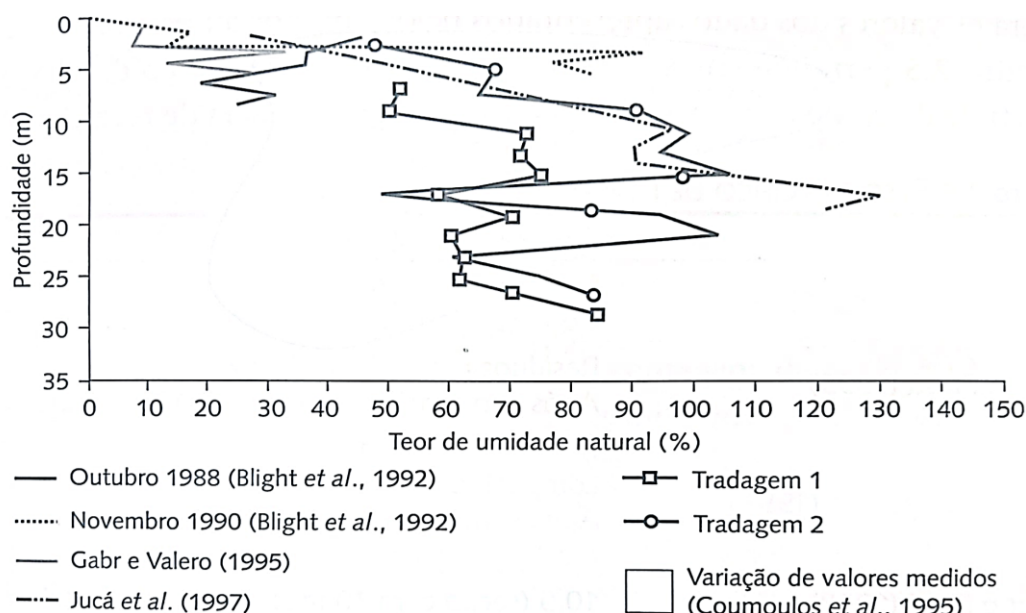
**Tabela 6 - Valores para o teor de umidade de RSU (MARQUES, 2001).**

| REFERÊNCIA                   | UMIDADE (%)             | ATERRO SANITÁRIO            |
|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| GIFFORD <i>et al.</i> (1990) | 14 a 68                 | Albany (EUA)                |
| EDIL <i>et al.</i> (1990)    | 10 a 50                 | Vários (EUA)                |
| BLIGHT <i>et al.</i> (1992a) | 10 a 45 <sup>(1)</sup>  | Limbro Park (África do Sul) |
| BLIGHT <i>et al.</i> (1992a) | 10 a 105 <sup>(2)</sup> | Limbro Park (África do Sul) |

| REFERÊNCIA                          | UMIDADE (%) | ATERRO SANITÁRIO         |
|-------------------------------------|-------------|--------------------------|
| TCHOBANOUGLOUS <i>et al.</i> (1993) | 15 a 40     | Vários (EUA)             |
| COUMOULOS <i>et al.</i> (1995)      | 30 a 120    | Ano Liossia (Grécia)     |
| GABR E VALERO (1995)                | 30 a 130    | Pioneer Crossing (EUA)   |
| CARVALHO (1999)                     | 45 a 110    | Bandeirantes (Brasil)    |
| ZORNBERG <i>et al.</i> (1999)       | 10 a 50     | San Gabriel Valley (EUA) |

(1) valores obtidos ao início do período chuvoso; (2) valores obtidos após período chuvoso excepcional.

A figura a seguir apresenta o perfil da variação do teor de umidade de acordo com a profundidade segundo alguns autores, apresentado por Boscov (2008).



**Figura 15 – Variação do teor de umidade dos RSU com profundidade em maciços sanitários segundo alguns autores (BOSCOV, 2008).**

Segundo a publicação, a determinação e análise de perfis de umidade de aterros sanitários devem considerar a idade dos resíduos (disposições antigas tendem a apresentar umidades maiores do que resíduos recém dispostos) e a presença dos recobrimentos intermediários de solo, os quais apresentam umidades normalmente inferiores à dos resíduos.

- Índice de vazios

O índice de vazios é uma grandeza calculada, que utiliza a relação entre três parâmetros que podem ser medidos, a saber: peso específico aparente, peso específico dos sólidos e teor de umidade. Esta relação é definida a partir da seguinte expressão:

$$e = \frac{\gamma_s (1 + w)}{\gamma} - 1$$

Equação 1.3

onde:

$e$  = índice de vazios;

$\gamma_s$  = Peso específico dos sólidos;

$w$  = Teor de umidade;

$\gamma$  = Peso específico aparente.

Segundo Boscov (2008), o teor de umidade e o peso específico são de difícil determinação no caso dos RSU por causa da heterogeneidade da variabilidade temporal da composição, além da falta de ensaios normalizados específicos para determinação. Ainda segundo a autora, o peso específico dos sólidos é ainda mais difícil de determinar, pois varia significativamente para cada componente, acarretando grandes erros à utilização de um valor médio para todos os componentes, a exemplo do que se faz no caso de solos.

Afirma, portanto que, o índice de vazios é um valor sem muito significado para o caso dos RSU. Valores reportados mostram uma grande variação, entre 1 e 15, para resíduos densos e soltos.

- Temperatura

A temperatura no interior de aterros sanitários constitui importante fator para a deflagração e evolução dos processos de degradação dos resíduos sólidos urbanos. O valor da temperatura ao longo da profundidade pode ser medido com termômetros digitais, a partir de tubos estrategicamente dispostos no aterro.

Coumoulos *et al.* (1995) realizaram uma série de medidas de temperatura, em diferentes períodos do ano, no aterro Ano Liossia, na Grécia, tendo obtido valores entre 40 e 60 °C à pequenas profundidades e entre 5 e 15 °C à grandes profundidades. Registre-se que estes valores não apresentaram variações, por conta de alterações na temperatura ambiente, nas diferentes épocas dos levantamentos.

Yoshida *et al.* (1996, *apud.* MARQUES, 2001) desenvolveram um modelo para avaliar a distribuição de temperaturas no interior de aterros sanitários, incorporando formulações para ter em conta os processos de geração e transporte de calor devido à decomposição biológica dos resíduos. O estudo permitiu concluir que durante o processo de aterramento a decomposição aeróbia é responsável por temperaturas

mais elevadas (60 a 70 °C), enquanto temperaturas menores, da ordem de 50 °C, podem ser atribuídas unicamente à decomposição anaeróbia dos resíduos. Os autores confirmaram portanto, que as alterações de temperatura no interior de aterros sanitários podem refletir o estágio de decomposição biológica dos resíduos, sendo um importante parâmetro para avaliação da atividade e eventual reaproveitamento destes maciços. Carvalho (1999) registra temperaturas da ordem de 31°C e 38°C para resíduos localizados, respectivamente, a cerca de 4,0 e 6,0m de profundidade no Aterro Sanitário Bandeirantes, em São Paulo. Para o mesmo aterro, relatórios de avanço de perfuração para instalação de drenos apontam para temperaturas entre 42°C e 59°C a profundidades da ordem de 30,0m.

- Permeabilidade

A permeabilidade dos resíduos constitui importante parâmetro para a concepção e detalhamento dos sistemas de drenagem do biogás e dos líquidos percolados dos aterros sanitários. Tal parâmetro é usualmente obtido através de ensaios laboratoriais ou *in situ*. A Tabela 7 apresenta um conjunto de resultados obtidos na literatura e sistematizados por Boscov (2008). A análise dos resultados do estudo permite observar que os valores de permeabilidade situam-se, normalmente, entre  $10^{-4}$  m/s e  $10^{-7}$  m/s, o que poderia ser comparado ao comportamento de areias muito finas, sendo o coeficiente  $10^{-5}$  m/s, um valor recomendado para uma primeira utilização em projeto.

**Tabela 7 - Valores de coeficiente de permeabilidade de RSU apresentados por diversos autores (adaptada de BOSCOV, 2008)**

| REFERÊNCIA                                  | COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (m/s)           | MÉTODO                |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|
| FUNGAROLI <i>et al.</i> (1979) <sup>1</sup> | $10^{-5}$ a $2 \times 10^{-4}$                | Lisímetros            |
| KORIATES <i>et al.</i> (1983) <sup>1</sup>  | $3,15 \times 10^{-5}$ a $5,1 \times 10^{-5}$  | Ensaio de laboratório |
| FANG (1983) <sup>5</sup>                    | $1,5 \times 10^{-2}$                          | Ensaio de laboratório |
| OWEIS E KHERA (1986) <sup>1</sup>           | $1,0 \times 10^{-5}$                          | Ensaio <i>in situ</i> |
| OWEIS <i>et al.</i> (1990) <sup>1</sup>     | $1,0 \times 10^{-5}$                          | Ensaio de Bombeamento |
| LANDVA E CLARK (1990) <sup>1</sup>          | $1,00 \times 10^{-5}$ a $4,00 \times 10^{-4}$ | Ensaio <i>in situ</i> |
| MANASSERO (1990) <sup>1</sup>               | $1,50 \times 10^{-5}$ a $2,60 \times 10^{-4}$ | Ensaio de Bombeamento |
| BRANDL (1990) <sup>1</sup>                  | $3,00 \times 10^{-7}$ a $5,00 \times 10^{-6}$ | Ensaio <i>in situ</i> |

| REFERÊNCIA                                   | COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (m/s)           | MÉTODO                                          |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| BRANDL (1994) <sup>1</sup>                   | $3,00 \times 10^{-8}$ a $5,00 \times 10^{-4}$ | Ensaio de laboratório                           |
| CEPOLINA <i>et al.</i> (1994)                | $1,00 \times 10^{-7}$                         | Ensaio de Bombeamento                           |
| EHRLICH <i>et al.</i> (1994) <sup>2</sup>    | $1,00 \times 10^{-5}$                         | Ensaio <i>in situ</i> (Furo de sondagem)        |
| GABR E VALERO (1995) <sup>1</sup>            | $1,00 \times 10^{-7}$ a $1,00 \times 10^{-5}$ | Ensaio de laboratório                           |
| BEAVEN E POWRIE (1995) <sup>1</sup>          | $1,00 \times 10^{-7}$ a $1,00 \times 10^{-5}$ | Ensaio de laboratório                           |
| JUCÁ <i>et al.</i> (1996) <sup>3</sup>       | $1,00 \times 10^{-7}$                         | Ensaio <i>in situ</i>                           |
| BLENGINO <i>et al.</i> (1996) <sup>1</sup>   | $3,00 \times 10^{-7}$ a $3,00 \times 10^{-6}$ | Ensaio <i>in situ</i> (Grande prof. - 10 a 30m) |
| MARIANO E JUCÁ (1998)                        | $1,89 \times 10^{-8}$ a $4,15 \times 10^{-6}$ | Ensaio <i>in situ</i> (Furo de sondagem)        |
| SANTOS <i>et al.</i> (1998) <sup>4</sup>     | $1,00 \times 10^{-7}$                         | Ensaio <i>in situ</i> (Furo de sondagem)        |
| CARVALHO (1999)                              | $5,00 \times 10^{-8}$ a $8,00 \times 10^{-6}$ | Ensaio de laboratório                           |
| AGUIAR (2001) <sup>2</sup>                   | $9,39 \times 10^{-7}$ a $1,09 \times 10^{-6}$ | Ensaio <i>in situ</i> (Permeômetro Guelph)      |
| CARVALHO (2002) <sup>5</sup>                 | $9,48 \times 10^{-6}$                         | Ensaio <i>in situ</i>                           |
| JANG <i>et al.</i> (2002) <sup>5</sup>       | $2,86 \times 10^{-7}$                         | Ensaio de laboratório                           |
| BARROS (2004) <sup>5</sup>                   | $7,92 \times 10^{-6}$                         | Ensaio de laboratório                           |
| DURMUSOGLU <i>et al.</i> (2006) <sup>5</sup> | $4,70 \times 10^{-6}$ a $1,24 \times 10^{-4}$ | Ensaio de laboratório                           |
| CALLE (2007) <sup>5</sup>                    | $1,57 \times 10^{-5}$                         | Ensaio de laboratório                           |

Fontes: 1 - MANASSERO *et al.* (1996); 2 - LAMARE NETO (2004); 3 - PEREIRA (2000); 4 - CARVALHO (1999); 5 - DURMUSOGLU *et al.* (2006)

No tocante à relação com o peso específico, diversos autores verificaram a redução da condutividade hidráulica dos resíduos sólidos com a densificação do material. Oweis e Khera (1986) apresentam coeficientes de permeabilidade para os resíduos sólidos urbanos entre  $1,50 \times 10^{-4}$  m/s e  $7,10 \times 10^{-6}$  m/s, para pesos específicos entre 5,60 kN/m<sup>3</sup> e 11,20 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente. São ainda apontados, na mesma linha, coeficientes de permeabilidade entre  $9,6 \times 10^{-4}$  m/s e  $4,7 \times 10^{-7}$  m/s, obtidos em laboratório, para resíduos com pesos específicos entre 1,6 e 4,8 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Konig e Jessberger (1997), com base na análise de um conjunto de curvas de compactação apresentadas na literatura, afirmaram que a variação do peso específico dos resíduos sólidos com o aumento do teor de umidade obedece a um

comportamento similar ao observado para os solos. A Figura 16 apresenta o referido conjunto de curvas, obtidas para diversos tipos de resíduos, a partir de ensaios de compactação tipo Proctor.

No tocante a ensaios de compactação com resíduos sólidos urbanos em laboratório, no entanto, são muito poucos os relatos disponíveis na literatura, destacando-se o trabalho de Gabr e Valero (1995). Os autores ensaiaram resíduos domiciliares com idade entre 15 e 30 anos, utilizando os procedimentos preconizados pela norma ASTM D698-78 para compactação de solos em laboratório com energia normal (*Standard Proctor Test*).

A Figura 16 mostra ainda a relação entre o teor de umidade e o peso específico seco obtida. O peso específico seco máximo foi estimado em  $9,3 \text{ kN/m}^3$  associado a um teor de umidade ótimo de 31%. A saturação completa foi atingida com um teor de umidade de cerca de 70%, correspondendo a um peso específico seco de aproximadamente  $8,0 \text{ kN/m}^3$ .

A curva de índice de vazios de ar nula ( $S_r = 100\%$ ) foi obtida utilizando para a densidade das partículas sólidas um valor igual a 2, a qual foi igualmente determinada em laboratório. A composição média dos resíduos ensaiados apresentava as seguintes percentagens em peso de materiais: cinzas, solo e rocha (33%); tecidos (23%), metais (10%), plásticos (13%), papéis (2%), madeiras (9%) e materiais cerâmicos (10%).

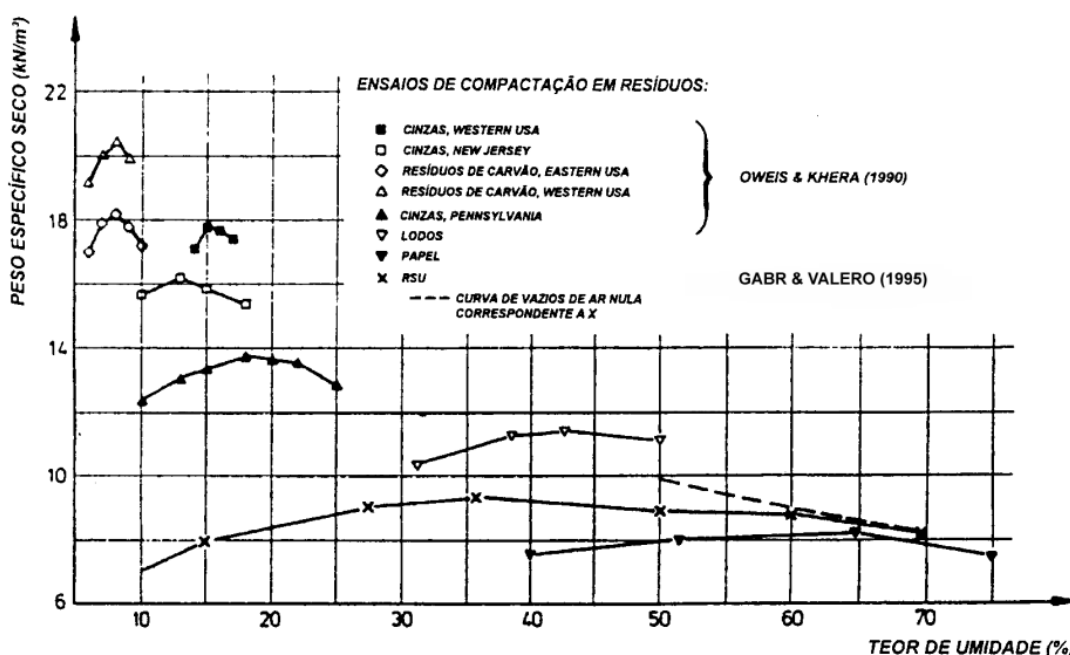


Figura 16 - Curvas de compactação para diferentes tipos de resíduos, considerando teor de umidade (KONIN E JESSBERGER, 1997)



Quanto a este parâmetro, vale ainda registrar os dados apresentados por Oweis e Khera (1990), que apontam para relações entre pesos específicos compactados e não compactados de constituintes dos resíduos, situadas entre 3 e 5, podendo atingir valores iguais a 10 para o caso de resíduos plásticos bem compactados.

De qualquer forma, deve-se ter em consideração que tal parâmetro é extremamente dependente das operações de lançamento e disposição, do grau de compactação inicial, das pressões do material sobrejacente, da temperatura e da idade e grau de decomposição do resíduo.

#### 1.4.2 Propriedades mecânicas

As principais propriedades mecânicas a serem consideradas ao se estudar o comportamento dos Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos (ARSU) dizem respeito a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade dos resíduos, que são diretamente ligadas à composição e propriedades das suas partes constituintes, bem como às suas variações com o tempo e estágio de degradação.

A determinação dos parâmetros geotécnicos e da condição de estabilidade e deformação dos aterros sanitários exige modelos e métodos que representem adequadamente estes materiais. Os procedimentos da mecânica dos solos são comumente utilizados, associados à presença ou ausência de elementos de reforço. No entanto, segundo Manassero *et al.* (1996) algumas características específicas reforçam a necessidade da busca de modelos de análise próprios, tais como:

- I. Índice de vazios muito elevado, implicando significativa compressibilidade volumétrica;
- II. Partículas de distintas naturezas, muitas delas frágeis e deformáveis;
- III. Processo de decomposição com o tempo, implicando auto consolidação;
- IV. Variação das propriedades dos materiais com o tempo.

Para obtenção das propriedades mecânicas de resíduos com partículas de pequenas dimensões e com comportamento similar ao dos solos podem ser utilizados mais facilmente métodos e ensaios laboratoriais convencionais, amplamente conhecidos, tais como ensaio de cisalhamento direto ou ensaio triaxial. No entanto, para resíduos com partículas de grandes dimensões e para os resíduos com comportamento não similar ao dos solos, modificações consideráveis nos

equipamentos e procedimentos de ensaio são necessárias. Nesses casos, a execução de ensaios *in situ* ou aterros experimentais apresentam-se como opção mais adequada para a obtenção de parâmetros mecânicos.

- Resistência ao cisalhamento

A análise de estabilidade de aterros sanitários é na maioria das vezes realizada a partir do método de equilíbrio limite de maciços em solo. Essa análise leva em consideração a geometria prevista para o empreendimento, visando a maior disposição de resíduos na menor área possível e utilizando declividades de taludes adequadas para garantia de fator de segurança mínimo de 1,50.

Essa estabilidade em RSU está associada a um ângulo de atrito interno e uma coesão, definidos a partir de envoltória de resistência. A coesão se deve aos componentes fibrosos que imprimem comportamento similar ao de solo reforçado, conhecido como “efeito fibra”, dessa forma, tanto mais presentes, maior será o intercepto coesivo existente. No entanto, no estágio inicial de disposição, é considerada inexistente, pois os resíduos ainda se apresentam como granulares. Esta relação direta, porém, não é identificada em relação ao ângulo de atrito. A evolução do comportamento desses parâmetros, em resíduos com diferentes quantidades de componentes fibrosos, com a deformação axial, pode ser observada na Figura 17 e na Figura 18.

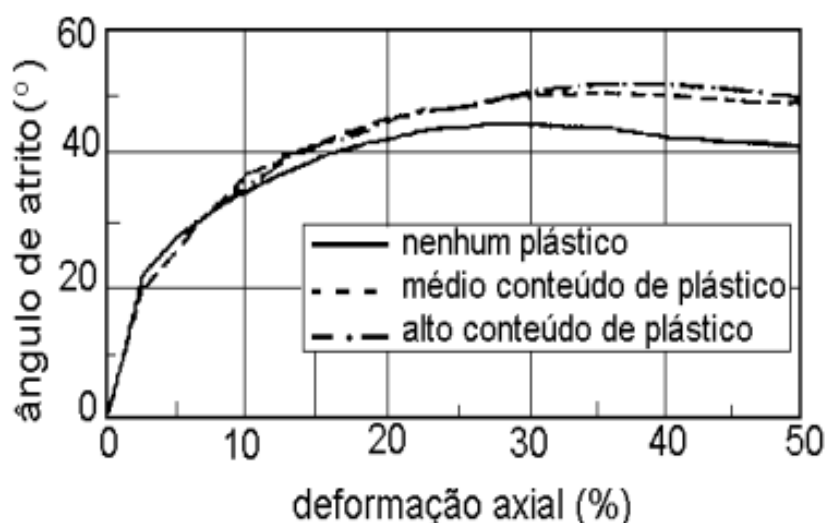
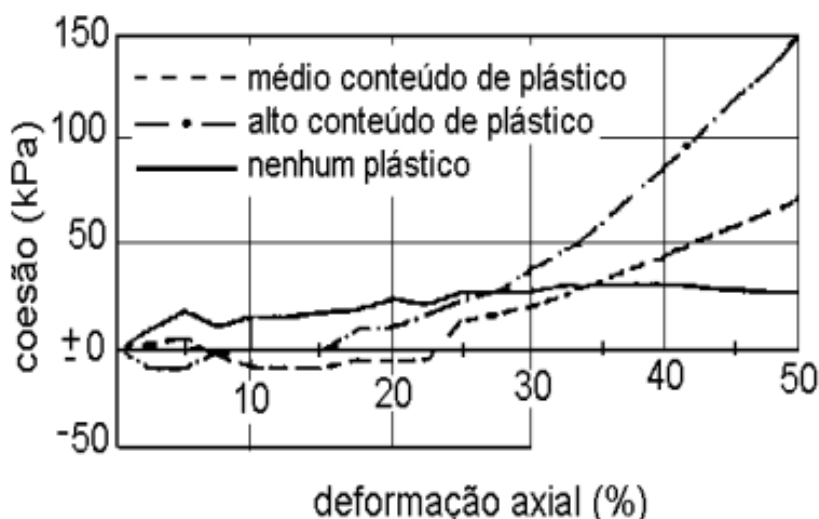


Figura 17 – Mobilização do ângulo de atrito em resíduos com diferentes quantidades de materiais fibrosos com o avanço da deformação axial, segundo Konig e Jessberger, 1997 (apud. NASCIMENTO, 2007).



**Figura 18 - Mobilização do intercepto coesivo em resíduos com diferentes quantidades de materiais fibrosos com o avanço da deformação axial, segundo König e Jessberger, 1997 (apud. NASCIMENTO, 2007).**

Tendo em vista que os maciços de resíduos sólidos urbanos podem apresentar elevadas deformações sem atingir um estado de ruptura, com resistência crescente, os parâmetros devem ser especificados para um nível de deformação aceitável para o maciço (BOSCOV, 2008).

Alguns autores realizaram estudos e ensaios que se tornaram referência, sendo possível observar concordância entre alguns e total discrepância entre outros, ocorrendo grande variabilidade de resultados.

Um resumo desses estudos, bem como suas condições de análises estão apresentados a Tabela 8, onde é possível observar a coesão variando entre 0 e 116 kPa, e o ângulo de atrito entre 0° e 49°.

Alguns autores ainda procuraram sistematizar essas variações, definindo faixas de valores para projeto. Bouazza e Wojnarowicz (1999) por exemplo, sugerem valores de ângulo de atrito de 25° a 35° para coesão nula e ângulo de atrito de 22° correspondendo a uma coesão entre 5 e 23 kPa. Já Sanchez *et al.* (1993) sugerem valores de ângulo de atrito de 22,5° a 27° para coesão nula, e coesão entre 1 e 13 kPa para ângulo de atrito de 22°. Essas propostas podem ser vistas na Figura 19.

**Tabela 8 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU apresentados por diversos autores (adaptada de BOSCOV, 2008)**

| REFERÊNCIA                | COESÃO<br>C (kPa) | ANG.<br>ATRITO<br>$\phi$ (°) | MÉTODO           |
|---------------------------|-------------------|------------------------------|------------------|
| LUKAS (1985) <sup>3</sup> | 39,00             | 34,50                        | Ens. triaxial CU |

| REFERÊNCIA                                    | COESÃO<br>C (kPa) | ANG.<br>ATRITO<br>$\varphi$ (°) | MÉTODO                                                                                           |
|-----------------------------------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PAGOTTO E RIMOLDI (1987) <sup>2</sup>         | 29,00             | 22,00                           | Prova de carga em maciço sanitário                                                               |
| LANDVA E CLARK (1990) <sup>1</sup>            | 19,00-22,00       | 24,00-39,00                     | Ens. cisalhamento direto (tensão normal superior a 480 kPa)                                      |
| JESSBERGER E KOCKEL (1991) <sup>3</sup>       | 22,00             | 46,00                           | Ens. triaxial (20% de deformação axial)                                                          |
| IPT (1991) <sup>1</sup>                       | 13,50             | 22,00                           | Retroanálise de escorregamento                                                                   |
| RICHARDSON E REUNOLDS (1991) <sup>1</sup>     | 10,00             | 18,00-43,00                     | Tensão normal de 4 a 38 kPa                                                                      |
| HOWLAND E LANDVA (1992) <sup>2</sup>          | 17,00             | 33,00                           | Resíduos de 10 a 15 anos, ens. cisalhamento direto (tensão normal de 580 kPa e desloc. de 10 cm) |
| GRECCO E OGGERI (1993) <sup>1</sup>           | 16,00             | 21,00                           | Peso específico de 5 kN/m <sup>3</sup>                                                           |
| GABR E VALERO (1995) <sup>1</sup>             | 0,00-27,50        | 20,50-39,00                     | Resíduos antigos                                                                                 |
| JESSBERGER (1995) <sup>1</sup>                | 41,00-51,00       | 42,00-49,00                     | Resíduos novos                                                                                   |
| KOLSCH (1995) <sup>3</sup>                    | 0,00              | 17,70                           | Ens. cisalhamento direto em resíduos antigos                                                     |
| WITHIAM <i>et al.</i> (1995) <sup>2</sup>     | 10,00             | 30,00                           | Resíduos de 3 a 7,5 anos, ens. cisalhamento direto (tensão normal entre 0 e 21 kPa)              |
| KAVAZANJIAN <i>et al.</i> (1995) <sup>2</sup> | 24,00             | 0,00                            | Tensão normal < 30 kPa (resultados de diversos autores)                                          |
|                                               | 0,00              | 33,00                           | Tensão normal > 30 kPa                                                                           |
| KAOMOTO E CEPOLLINA (1996)                    | 13,50             | 22,00                           | Resíduos antigos                                                                                 |
|                                               | 16,00             | 22,00                           | Retroanálises de escorregamento                                                                  |
|                                               | 16,00             | 28,00                           | Disposição de menos de 2 anos e dren. intensa                                                    |
| SHIMIZU (1996)                                | 15,00-91,00       | 8,00-20,40                      | Ens. triaxial CD em resíduos antigos                                                             |
|                                               | 26,00-36,00       | 4,3-6,40                        | Ens. triaxial UU em resíduos antigos                                                             |
|                                               | 48,00-116,00      | 30,00-47,00                     | Ens. Cisalhamento direto em resíduos novos                                                       |
| VAN IMPE (1998) <sup>2</sup>                  | 22,00             | 0,00                            | Tensão normal < 20 kPa (resultados de diversos autores)                                          |
|                                               | 0,00              | 38,00                           | Tensão normal > 20 kPa                                                                           |

| REFERÊNCIA                   | COESÃO<br>C (kPa) | ANG.<br>ATRITO<br>$\phi$ (°) | MÉTODO                                                                                      |
|------------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| CARVALHO (1999)              | 42,00-60,00       | 21,00-27,00                  | Ens. de laboratório (20% de deformação axial)                                               |
| VILAR <i>et al.</i> (2006)   | 20,00             | 22,00                        | Ens. de laboratório (10% de deformação axial)                                               |
| AZEVEDO <i>et al.</i> (2006) | 10,00             | 28,00                        | Prova de carga em lísimetro com fórmula para sapata com resíduo intacto (35% de deformação) |

Fontes: 1 – KAIMOTO E CEPOLLINA (1996); 2 – AZEVEDO *et al.* (2006); 3 – MARQUES (2001).

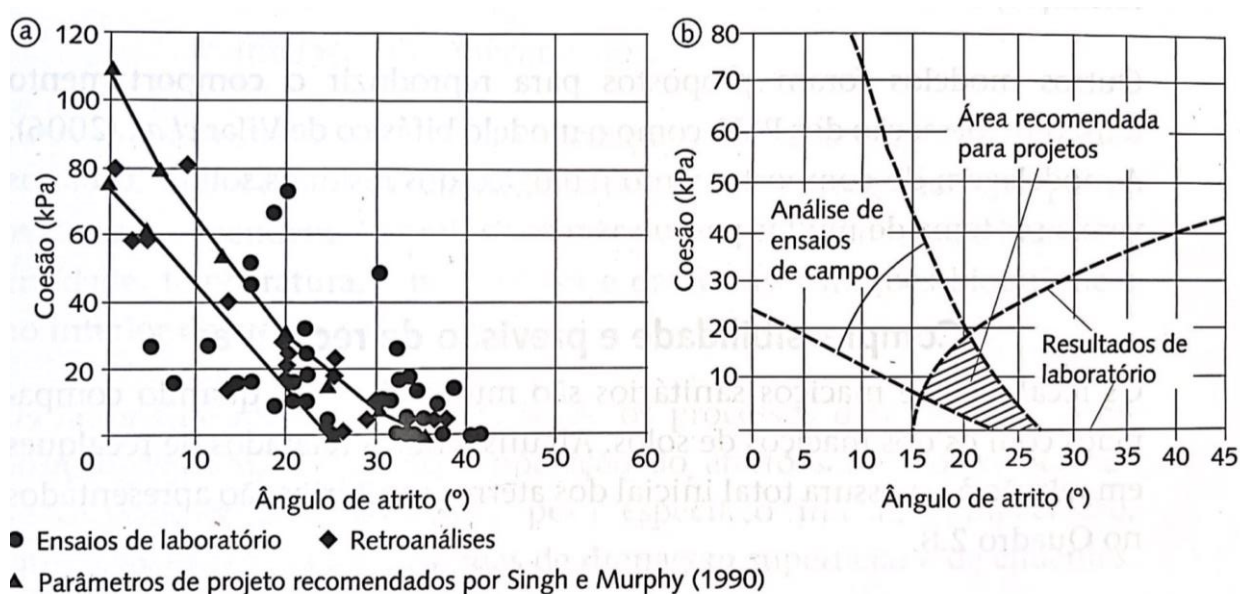


Figura 19 - Faixas recomendadas de parâmetros de resistência dos RSU, segundo (a) Bouazza e Wojnarowics, 1999 e (b) Sanchez *et al.*, 1993 (*apud.* BOSCOV, 2008).

Os valores dessas parcelas são influenciados por diversos fatores, tais como, a composição e idade do resíduo, o teor de umidade e de matéria orgânica, o grau de compactação e a dimensão das partículas e são estimados por interpretação bibliográfica associada a: (a) ensaios de laboratório, (b) ensaios de campo ou (c) retroanálises de rupturas.

Dixon *et al.* (2005) apresentam um resumo de métodos de determinação de resistência ao cisalhamento de RSU mais utilizados, apresentando os desafios de cada um deles.

**Tabela 9 – Métodos de determinação da resistência ao cisalhamento do RSU (adaptada de DIXON, 2005).**

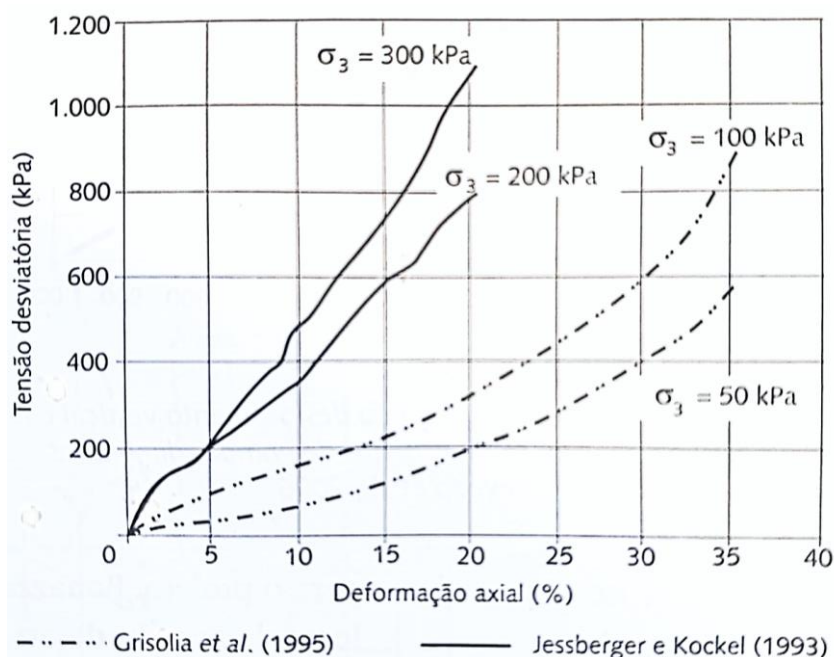
| MÉTODO                | DESCRIÇÃO                          | OBSERVAÇÃO                                                                                                                        | REFERÊNCIA                                                                          |
|-----------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Ensaio de Laboratório | Compressão Triaxial                | Amostras deformadas, não há a obtenção da resistência de pico devido a compressão e densificação da amostra                       | JESSBERGER (1994), GRISOLIA <i>et al.</i> (1995)                                    |
|                       | Cisalhamento Direto                | Requer equipamentos de grande porte (1 x 1 x 1m), amostras deformadas, grandes deslocamentos para mobilizar a resistência de pico |                                                                                     |
|                       | Cisalhamento Simples               | Equipamentos de grande porte, amostras deformadas, informação útil do módulo de rigidez cisalhante                                | KAVAZANJIAN <i>et al.</i> (1999)                                                    |
| Ensaio de Campo       | Cisalhamento Direto <i>in situ</i> | Dificuldade na execução e resultados relacionados a baixos níveis de tensão                                                       | JESSBERGER E KOCKEL (1993)                                                          |
|                       | SPT, CPT e Vane test               | Relação não muito clara entre a resistência a penetração e a resistência ao cisalhamento do RSU                                   |                                                                                     |
| Retroanálise          | Ruptura de Taludes                 | Informações adequadas raramente disponíveis                                                                                       | KOENER E SOONG (2000)                                                               |
|                       | Corte em taludes                   | Grandes deformações observadas, mas sem apresentar ruptura                                                                        | SINGH E MURPHY (1990), COWLAND <i>et al.</i> (1993), GOTTELAND <i>et al.</i> (2002) |
|                       | Taludes estáveis                   | Mudando a composição dos resíduos, as experiências passadas não servem como guia para futuros desempenhos                         |                                                                                     |

#### a) Ensaios laboratoriais

Os ensaios de cisalhamento direto e os ensaios triaxiais realizados em laboratório têm sido utilizados por diversos autores, admitindo a validade da lei de Mohr Coulomb. A maior limitação dos ensaios em laboratório se apresenta na dificuldade de se obter amostras representativas do maciço, bem como na necessidade do emprego de equipamentos especiais de grandes dimensões.

Nesses ensaios, a interpretação dos resultados utiliza conceitos teóricos do comportamento de solos, no entanto, verifica-se que os RSU apresentam grandes deformações sem atingir pico de tensão cisalhante, pouco comum entre os solos. Segundo König e Jessberger (1997), a ruptura não é claramente atingida, mesmo para elevadas tensões de compressão e o resíduo continua ganhando resistência com o aumento das deformações a que é submetido. Isso evidencia que os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos urbanos são extremamente dependentes do nível de deformações impostos aos mesmos. Desta forma, faz-se necessário esclarecer o critério de deformação para que os parâmetros de resistência sejam compreendidos.

Algumas curvas de tensão-deformação típicas obtidas por Grisolia *et al.* (1991) e Jessberger e Kockel (1993) em ensaios de compressão com RSU foram reunidas por Manassero *et al.* (1996) e estão apresentadas na Figura 20, todas demonstram grandes deformações sem ativar a tensão de pico cisalhante.



**Figura 20 - Relação tensão-deformação típica dos RSU apresentada por Manassero *et al.* 1996 (apud. BOSCOV, 2008).**

A Figura 21 apresenta um conjunto de curvas que representa a variação dos parâmetros de resistência mobilizados, obtidos a partir de ensaios triaxiais em amostras de grande dimensão, para várias idades de resíduo, em função das deformações registradas.

Nela é possível observar que o ângulo de atrito máximo é mobilizado para deformações de aprox. 20%, podendo ser representativo do seu estado limite de ruptura, independente do seu grau de compactidade, que interferiu apenas e diretamente na sua magnitude, enquanto o material não compactado indicou ângulo de atrito aproximadamente de  $18^\circ$ , o compactado atingiu a ordem de  $40^\circ$ .

A coesão, por outro lado, não apresenta, próxima à deformação de 20% ou qualquer outra similar, sinais do limite desse material, aparentando necessitar de deformações bem maiores para sua mobilização, independente da faixa de idade do material. A maior coesão apresentada foi verificada no material com idade de 7-10 anos, enquanto a menor aconteceu nos resíduos mais recentes, 9 meses e 1-3 anos quase sobrepostas.

Acréscimos de densidade com o tempo podem igualmente aumentar a resistência dos resíduos, efeito este que pode ser anulado ou mesmo revertido, perante a intensidade dos processos de biodegradação atuantes no maciço (KNOCHENMUS *et al.*, 1998).

Outra constatação importante diz respeito a ampla faixa de variação dos valores de resistência, mobilizados para uma determinada deformação, em função da idade do resíduo. Para  $\varepsilon=20\%$ , por exemplo, o ângulo de atrito varia entre 10 e 40° e a coesão entre 25 e 200 kPa, em função da idade do resíduo. Os resultados não permitem concluir, no entanto, qualquer relação entre redução da resistência com aumento da idade do resíduo.

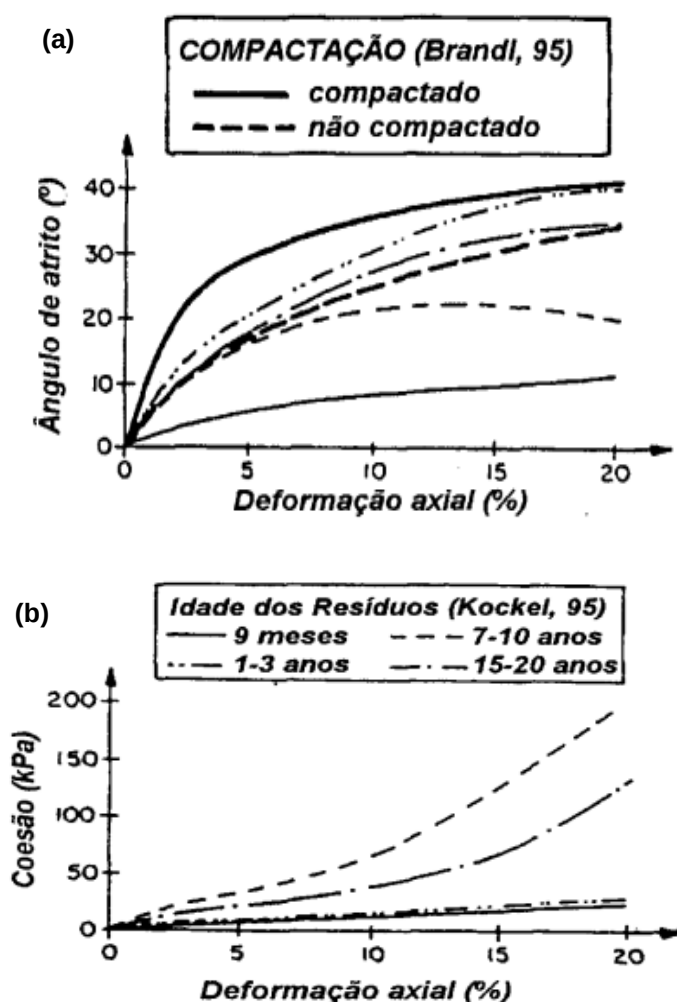


Figura 21 - Parâmetros de resistência mobilizados (a) ângulo de atrito e (b) coesão, em função do nível de deformação e idade, segundo Koning e Jessberger, 1997 (apud. MARQUES, 2001).

Outro fator preponderante para a determinação dos parâmetros de resistência, em especial quando não há efeito de reforço por fibras, é o teor de umidade. Gabr e Valero (1995) observaram redução significativa da coesão quando o teor de umidade



foi acrescido em 10% (de 55% para 65%), resultando numa redução de 60 kPa (de 100 kPa para 40 kPa).

Ao analisar os resultados dos estudos, cruzando dados de ensaios, alguns autores propõem algumas parametrizações:

1. KOCKEL E JESSBERGER (1995): Com base em resultados de ensaios laboratoriais, indicam uma envoltória linear para definir a mobilização da resistência ao cisalhamento dos resíduos, sem no entanto, considerar o efeito do reforço das fibras;
2. KAVAZANJIAN *et al.* (1995): Com base em resultados de ensaios laboratoriais e *in situ* e em retroanálises, propõem uma envoltória de resistência bilinear com as seguintes características:
  - a) Tensões inferiores a 30 kPa - os resíduos apresentam comportamento puramente coesivo ( $c=24\text{kPa}$ );
  - b) Tensões superiores a 30 kPa - o comportamento dos resíduos passa a ser friccional com um ângulo de atrito igual a  $33^\circ$ .
3. MANASSERO *et al.* (1996): A partir de resultados publicados compilados, propõe uma envoltória de resistência trilinear com as seguintes características:
  - a) Tensões inferiores a 20 kPa - os resíduos apresentam comportamento puramente coesivo ( $c=20\text{kPa}$ );
  - b) Tensões entre 20 e 60 kPa - o comportamento do material passa a ser puramente friccional ( $\phi=38^\circ$ );
  - c) Tensões superiores a 60 kPa - os resíduos possuem ambas as parcelas ( $c \geq 20\text{kPa}$  e  $\phi=30^\circ$ ).

Por outro lado, Singh e Sun (1995), com base em valores medidos e observados, apresentam uma relação entre a resistência ao cisalhamento dos resíduos e a profundidade. Os autores sugerem também a existência de uma profundidade crítica, a partir da qual as tensões verticais efetivas não contribuem para a resistência ao cisalhamento dos resíduos. A partir da figura a seguir é possível observar comparativamente a proposta de Singh e Sun (1995) com as propostas de Kavazanjian *et al.* (1995) e Howland e Landva (1992) onde constata-se uma profundidade crítica da ordem de 55,0m e valores limites para resistência dos resíduos de cerca de 250 kN/m<sup>2</sup>.

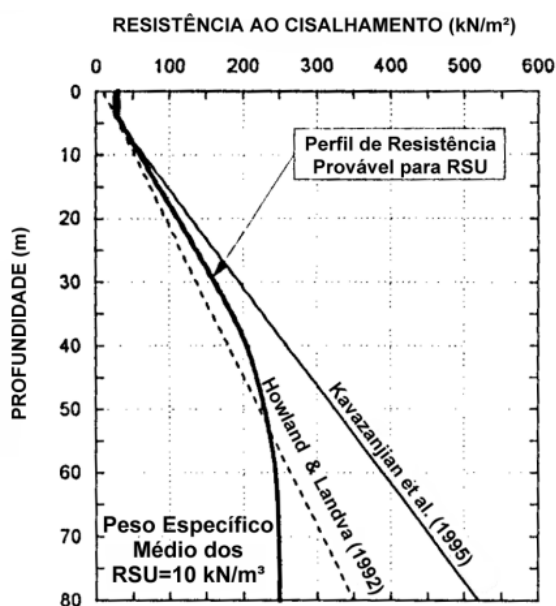


Figura 22 - Variação da resistência ao cisalhamento dos resíduos com a profundidade (SINGH E SUN, 1995).

#### b) Ensaios *in situ*

Outra forma de obtenção das características de resistência dos resíduos sólidos, assim como ocorre com diversos materiais, baseia-se em ensaios *in situ*. Inúmeros trabalhos relatam resultados de ensaios tais como SPT, CPT, pressiômetro e *vane test*. No entanto, observa-se entre eles considerável dispersão de valores, tornando complexa a interpretação dos dados, bem como a correlação dos resultados para outros casos. Esta dificuldade está vinculada a heterogeneidade do material, muitas vezes com presença de componentes resistentes como madeira, pedra e metal, que ocasionam grandes picos na resistência aferida num local específico, além de muitas vezes causar desvios e avarias nas hastes dos equipamentos. Dessa forma, os parâmetros de resistência obtidos a partir desses resultados acabam exigindo confirmação por outros métodos antes de utilização em projetos e trabalhos de pesquisa.

No caso do ensaio SPT, conforme destaca Knochenmus *et al.* (1998), ainda não existe correlação entre o número de golpes NSPT e a resistência ao cisalhamento dos resíduos.

Quanto aos ensaios CPT, alguns autores como Koda (1998b) e Duchêne *et al.* (1998) apresentam propostas de coesão e ângulo de atrito em função dos resultados obtidos.

Withiam *et al.* (1995) descrevem a realização de 5 ensaios de cisalhamento de resíduos sólidos urbanos *in situ*. Os autores ensaiaram amostras com dimensões de 1,5 x 1,5 x 1,5m, submetendo-as a tensões normais que variaram entre 0 e 21 kPa. A envoltória de ruptura foi definida por uma coesão de 10 kPa e um ângulo de atrito de cerca de 30°. Ensaio semelhante foi realizado por Richardson e Reynolds (1991), resultando em valores de coesão iguais a 10 kPa e ângulo de atrito entre 18° e 43°.

Já Sharma *et al.* (1990) defendem que os ensaios sísmicos, tipo *cross-hole*<sup>2</sup> e *down-hole*<sup>3</sup> permitem a obtenção de propriedades dinâmicas dos materiais e têm sido utilizados para o reconhecimento e caracterização de aterros sanitários. A partir da velocidade de propagação da onda pelo maciço e da densidade dos materiais investigados, é possível determinar o módulo de Young, o coeficiente de Poisson e o módulo de deformabilidade transversal dos materiais. Desta forma, os autores obtiveram valores iguais a 28,9 MPa, 84,4 MPa e 0,46, respectivamente, para o módulo de deformabilidade transversal ou de cisalhamento ( $G$ ), módulo de elasticidade ou de deformação ( $E$ ) e para o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Os parâmetros foram obtidos num aterro da Califórnia (EUA), baseados em um peso específico estimado de 7,2 kN/m<sup>3</sup>.

No Brasil, de acordo com Carvalho e Vilar (1998), ensaios sísmicos tipo *cross-hole*, realizados no Aterro Sanitário Bandeirantes (SP), indicaram valores entre 0,25 e 0,35 para o coeficiente de Poisson e de 25 MPa e 10 MPa para os módulos de deformação e de cisalhamento, respectivamente, admitindo um peso específico de 8 kN/m<sup>3</sup>.

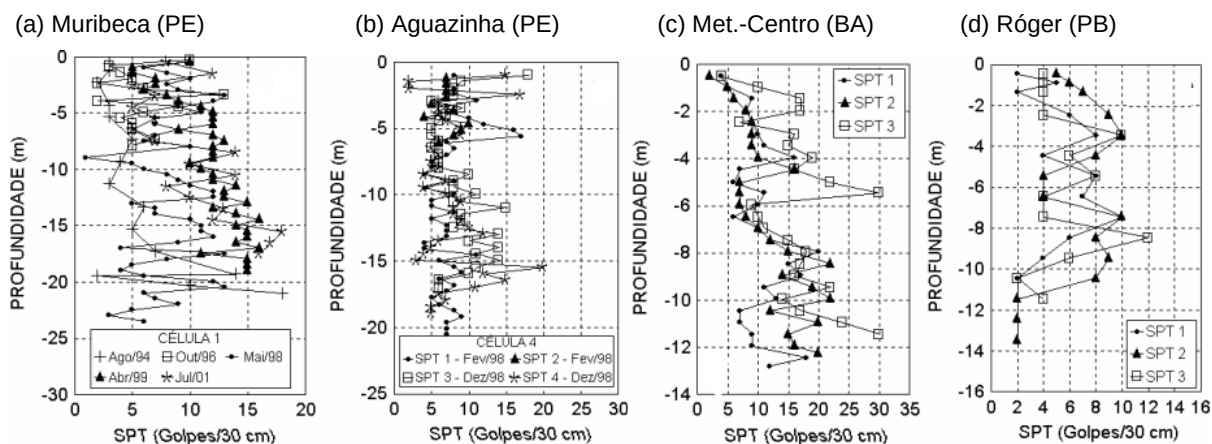
Ainda no Brasil, Jucá (2003) realizou ensaios de SPT em maciços de resíduos situados na Bahia, Paraíba e Pernambuco, região Nordeste do Brasil, sendo eles, três aterros sanitários e um lixão. Nos aterros Muribeca e Aguazinha e no lixão Róger, os resultados de resistência se apresentaram razoavelmente constantes ao longo de toda profundidade analisada, e no aterro Metropolitano-Centro, verificou-se um sutil crescimento dos valores de resistência à penetração com o aumento da profundidade. Para os três primeiros casos, o número de golpes do ensaio SPT permaneceram entre

---

<sup>2</sup> Este ensaio consiste na geração de ondas sísmicas P e S em um furo de sondagem (Fonte) e seu registro em um ou mais furos adjacentes (Sensores). O objetivo é captar as ondas que se propagam em subsuperfície sem que elas sofram os fenômenos de refração e reflexão.

<sup>3</sup> Diferente do *cross-hole*, ocorre em apenas um furo, com a Fonte na superfície e os Sensores posicionados no interior do furo.

2 e 10, e no segundo caso o número de golpes foi de 5 a 10 nos quatro metros iniciais e de 10 a 20 golpes no restante da profundidade.



**Figura 23 - Resultados de Ensaio SPT para maciços de resíduos em quatro maciços de resíduos do Nordeste do Brasil (JUCÁ, 2003).**

### c) Retroanálise

As propriedades de resistência obtidas a partir de retroanálises devem ser utilizadas e vistas com cuidado, uma vez que podem existir diversas combinações para os parâmetros de resistência que satisfazem a condição de equilíbrio (uma equação e duas incógnitas).

A tabela a seguir apresenta alguns valores estimados por retroanálise para aterros sanitários existentes, simulando diversas condições geométricas e de segurança dos mesmos (KAVAZANJIAN *et al.*, 1995). Os ângulos de atrito apresentados foram obtidos, assumindo uma coesão de 5 kPa e utilizando o método de Bishop simplificado.

**Tabela 10 - Parâmetros de resistência estimados por retroanálises (KAVAZAJIAN *et al.*, 1995).**

| ATERRO<br>SANITÁRIO | TALUDE MÉDIO  |                 | TALUDE MÁXIMO |                 | ÂNGULO DE ATRITO DO<br>RESÍDUO (°) |        |       |
|---------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|------------------------------------|--------|-------|
|                     | ALTURA<br>(m) | TALUDE<br>(H:V) | ALTURA<br>(m) | TALUDE<br>(H:V) | FS=1,0                             | FS=1,1 | FS1,2 |
| L. Canyon, CA       | 120,00        | 2,50:1,00       | 35,00         | 1,70:1,00       | 25,00                              | 27,00  | 29,00 |
| Oll, CA             | 75,00         | 2,00:1,00       | 20,00         | 1,60:1,00       | 28,00                              | 30,00  | 34,00 |
| Babylon, NY         | 30,00         | 1,90:1,00       | 10,00         | 1,25:1,00       | 30,00                              | 34,00  | 38,00 |
| Private, OH         | 40,00         | 2,00:1,00       | 10,00         | 1,20:1,00       | 30,00                              | 34,00  | 37,00 |

Koda (1998), a partir de retroanálises, estimou parâmetros de resistência para resíduos sólidos dispostos em aterros sanitários da Polônia, e obteve ângulos de atrito

de 26° e 21°, e coesão de 20 e 15 kPa, respectivamente, para resíduos antigos e recentes. Eid *et al.* (2000), baseados na ruptura ocorrida em aterro sanitário próximo a Cincinnati, Ohio (EUA), definiram valores de 40 kPa para a coesão ( $c$ ) e de 35° para o ângulo de atrito ( $\phi$ ).

- Compressibilidade e recalque

Devido ao aumento do número de aterros sanitários e à necessidade de conhecimento do comportamento mecânico dos resíduos, a ocorrência de recalques dessas unidades tem sido bastante investigada (CATAPRETA, 2008).

Porém, ainda observa-se uma ausência significativa de dados sobre o desempenho de aterros sanitários brasileiros, principalmente devido à não realização de um acompanhamento sistemático dessas obras, através de instrumentação adequada.

Segundo Mariano e Jucá (2000), os resíduos dispostos em um aterro sofrem grandes recalques, com os quais seu volume diminui e sua capacidade de armazenamento aumenta, estando aí uma das principais causas de se quantificar os recalques. Além de definir a fase do processo de estabilização e com isto determinar camadas de resíduo a serem dispostas, determinando assim, a real capacidade de armazenamento do aterro.

De acordo com Boscov (2008) em sua sintetização sobre o assunto, a literatura traz registros de considerações máximas e mínimas de recalque em relação à altura inicial da camada feitas por diversos autores. Enquanto a menor mínima é defendida por Abreu (2000), 10%, a maior máxima é apresentada por Wall e Zeiss (1995), 50%. Apesar das variações de taxas consideradas, indiscutível é que os recalques de maciços sanitários são muito elevados quando comparados com os maciços de solos.

**Tabela 11 – Recalques em maciços sanitários (BOSCOV, 2008).**

| REFERÊNCIA                       | RECALQUE RELATIVO À ESPESSURA INICIAL |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| SOWERS (1973)                    | Da ordem de 30%                       |
| WALL E ZEISS (1995)              | Entre 25% e 50%                       |
| VAN MEERTEN <i>et al.</i> (1995) | Entre 10% e 25%                       |
| COUMOULOS E KORYALOS (1997)      | Entre 20% e 25%                       |
| ABREU (2000)                     | Entre 10% e 30%                       |

Segundo Sowers (1973), que desenvolveu os primeiros estudos sobre compressibilidade e recalque de RSU, os mecanismos causadores de recalques em aterros sanitários são os seguintes:

- Solicitação mecânica;
- Erosão e ravinamento interno;
- Alterações físico-químicas;
- Biodegradabilidade;
- Interações entre mecanismos;
- Dissipação de pressões neutras de líquidos e gases.

A solicitação mecânica se dá a partir de distorção, dobra, esmagamento e quebra e rearranjo dos materiais. Enquanto o ravinamento se dá pela erosão e migração de materiais finos para os vazios entre as partículas maiores. Estes materiais estão sujeitos a alterações físico-químicas que incluem processo de corrosão, oxidação e combustão. Já a biodegradação é causada por microrganismos, transferindo massa da fase sólida para as fases líquida e gasosa. Por fim, a dissipação das pressões neutras de líquidos e gases é um processo semelhante ao adensamento de solos, que ocorre com a expulsão de líquidos e gases do interior do maciço do aterro sanitário e demanda certo tempo. Boscov (2008) ainda inclui as deformações lentas sob carga constante em razão de fenômenos viscosos.

De acordo com Simões (2000) a identificação dos mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento de recalques em ARSU é de extrema importância para interpretação do comportamento, proposição de modelos de previsão e realização de simulações. Em vista desses inúmeros elementos envolvidos e devido às elevadas heterogeneidades e deformabilidades dos resíduos sólidos, assim como significativo índice de vazios presente nos maciços de RSU, Manassero *et al.* (1996) propuseram representar o processo de adensamento dos resíduos sólidos urbanos em algumas parcelas:

- Recalque por compressão física devido à distorção mecânica, flexão, esmagamento e reorientação das partículas, sob peso próprio dos resíduos e do material de cobertura;
- Recalque causado pela migração de pequenas partículas para grandes vazios existentes;

- Recalque provocado pelo processo de consolidação e pelo comportamento viscoso envolvendo a estrutura sólida e as partículas ou componentes isolados;
- Recalque provocado pela decomposição e biodegradação da matéria orgânica;
- Recalque por colapso dos componentes, provocado por processos físico-químicos, tais como corrosão, oxidação e degradação de compostos inorgânicos.

Grisolia e Napoleoni (1995) defendem que os resíduos sólidos urbanos, assim como os solos, são meios multifásicos constituídos de elementos sólidos, líquidos e gasosos, de comportamento e constituição distintos. E durante a fase sólida podem ser identificadas três categorias de materiais:

- I. Elementos inertes estáveis: metais, vidro e entulho de construção;
- II. Elementos muito deformáveis: papéis, plásticos e têxteis;
- III. Elementos biodegradáveis: alimentos.

A presença e o fluxo dos líquidos modificam as propriedades das partículas sólidas, gerando comportamentos reológicos diferentes. Como os resíduos apresentam componentes de elevada porosidade, que absorvem grandes volumes de fluidos, podem causar mudanças no seu estado físico e nas suas propriedades. Quando atinge o limite da capacidade de absorção, estes elementos se encontram saturados e, assim se observa o início da formação de chorume, os gases presentes durante a disposição inicial dos resíduos e os gases gerados durante o processo de decomposição de matéria orgânica.

De acordo com Sowers (1973) e Coumoulos e Koryalos (1997), os principais fatores que afetam a evolução dos recalques incluem a composição dos resíduos, o pré-tratamento recebido, o peso específico inicial, a compactação, a saturação, o tamanho e o modo de operação do aterro, a velocidade de disposição, a eficiência dos sistemas de drenagem superficial, de gases e de percolado, a oscilação do nível de percolado no interior do aterro, as condições do meio, como acidez, temperatura e umidade, e as condições biológicas.

Hossain *et al.* (2003) citam que com o avanço da decomposição dos resíduos, as propriedades de compressibilidade e subsequentemente as taxas e a magnitude dos recalques também mudam.

Simões (2000) e Simões e Catapreta (2010) apresentam que os principais fatores que influenciam as magnitudes de recalques em aterros sanitários são:

- Composição dos resíduos e porcentagem de material degradável;
- Peso específico e índice de vazios dos resíduos;
- Dimensões do aterro;
- Técnicas de compactação;
- Histórias de tensões, envolvendo todas as etapas de operação e após fechamento;
- Pré-tratamento dos resíduos (incineração, compostagem, mistura, fragmentação etc.);
- Nível de chorume e sua flutuação;
- Existência de sistemas de extração de gases;
- Fatores ambientais, tais como teor de umidade, temperatura e gases (no interior da massa).

De acordo com a experiência profissional do autor desse estudo, pode-se acrescentar aos fatores apresentados, o método da operação do aterro, com ou sem recirculação de líquidos lixiviados. Nos aterros com recirculação de líquidos lixiviados, a ocorrência de recalques pode ser mais significativa, devido a aceleração da decomposição de alguns resíduos ocasionada pela reintrodução desses líquidos no interior do aterro.

Wall e Zeiss (1995), dentre vários outros autores, caracterizam o recalque dos aterros sanitários como um processo de três fases:

- I. Compressão inicial: corresponde à deformação ocorrida quando um carregamento externo é aplicado ao aterro. Essa deformação está geralmente associada a uma redução dos vazios e dos tamanhos das partículas, ocorrendo instantaneamente, de forma análoga à compressão elástica que ocorre em solos;
- II. Compressão primária: ocorre geralmente após 30 dias da aplicação do carregamento e corresponde ao recalque devido à dissipação de pressões neutras de líquidos percolados e gases. A diferença com relação ao processo de adensamento primário em solos está na saturação do meio. Em aterros sanitários, dificilmente o meio se encontra saturado. Além disso, a literatura estrangeira considera que, devido à permeabilidade relativamente elevada, é improvável o desenvolvimento de pressões neutras em aterros sanitários. Boscov (2008) questiona esta última informação;



- III. Compressão secundária: corresponde ao recalque devido ao *creep*, por processos de deformação lenta dos componentes dos resíduos e por degradação biológica da matéria orgânica. É a maior parcela dos recalques que ocorrem em aterros de RSU, no entanto, o processo é lento e pode durar décadas.

Vários autores comentam que a caracterização dos recalques em três fases, como ocorre em solos, é questionável pelo fato de que não se pode afirmar que as fases são independentes, pelo contrário, provavelmente elas se sobrepõem.

Segundo Coduto (1990), os mecanismos de recalque ocorrem de forma associada ao processo de recalque, de tal maneira que os mecanismos de recalque se confundem com as fases de ocorrência dos recalques. As fases seriam:

- I. Compactação: correspondente ao mecanismo de solicitação mecânica;
- II. Adensamento: correspondente ao mecanismo de dissipação de pressões neutras;
- III. Contração: correspondente ao mecanismo de “perda de sólidos”, biodegradação e alterações físico-químicas.

No que diz respeito aos parâmetros de compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos, podem ser determinados através de ensaios laboratoriais, ensaios *in situ* e retroanálises, a partir de aterros experimentais.

A partir de ensaios de laboratório, por exemplo, pode ser estimado o módulo de rigidez secante do material ( $E_s$ ), o qual depende da tensão vertical ( $\sigma_v$ ), nível de deformações ( $\epsilon$ ), composição, grau de compactação e idade do resíduo e outros. No entanto, uma das maiores limitações dos ensaios laboratoriais diz respeito à não consideração da parcela de recalque devido à decomposição do resíduo, face ao elevado tempo necessário para a ocorrência do fenômeno.

Quanto aos ensaios *in situ*, destacam-se como os mais usados os ensaios de placa, além dos planos de monitoramento baseados em instrumentos estrategicamente instalados nos aterros sanitários. A análise dos resultados desses planos apresenta-se como importante ferramenta para interpretação e modelagem dos processos de deformação dos resíduos, permitindo a obtenção de curvas de recalque representativas e realistas.

Com base nos conceitos criados e aperfeiçoados por diversos autores e disponibilizados na literatura, associados à instrumentação e ensaios de campo e

laboratório, Jucá (2003) desenvolveu uma análise que, após estudar os quatro maciços de resíduos citados no item 1.4.2, concluiu sobre os recalques ocorridos:

- Houve uma relação direta entre aspectos mecânicos, biodegradativos e climáticos;
- Nos primeiros 380 dias, os recalques tiveram deformações acentuadas, devido a degradação da matéria orgânica, seguido de um período de recalques muito pequenos ou nulos, devido às baixas tensões impostas à massa para realizar compressão, aumentando vazios. Passado este período novamente ocorreu um aumento nas taxas de recalques, visto que as tensões aumentam e os vazios criados na fase anterior não suportam a carga, atingindo o colapso;
- A partir do período de precipitações intensas os recalques tenderam a se tornar menores, devido a desestabilização criada no ambiente microbiano e consequentemente nos recalques secundários.

Ainda a partir de resultados de ensaios de campo, Machado *et al.* (2010) realizaram diversos ensaios de carregamento de placa sobre resíduos sólidos urbanos em uma célula experimental visando avaliar a influência da densidade inicial dos resíduos, espessura da camada de cobertura e utilização de sobrecarga na compressibilidade do maciço de resíduos, e como principais conclusões, destacam-se:

- Aumento do recalque, sob um determinado nível de carregamento, com o aumento da área carregada, porém com valores inferiores aos previstos pela teoria da elasticidade;
- A compressibilidade dos resíduos é inversamente proporcional à densidade dos mesmos, apesar da elevada dispersão dos resultados obtidos;
- Significativa redução da compressibilidade dos resíduos com a aplicação de pré-carregamento;
- Redução dos recalques com o aumento da espessura da camada de solo de cobertura;
- Obtenção de coeficientes de compressão secundária ( $C_{\alpha}$ ) entre 0,05 e 0,07.

## 1.5 Aferição de recalque em aterros sanitários

Uma das pertinentes preocupações na operação de um aterro de resíduos sólidos é a segurança e estabilidade das camadas e taludes. Visando essa segurança da operação é necessário não somente a boa execução de compactação dos resíduos e cobertura deles, mas o monitoramento regular do maciço, compreendendo seus diversos comportamentos.

Para auxiliar nesse monitoramento, ao longo da história, foram desenvolvidos e aprimorados instrumentos capazes de mapear esses comportamentos, que cruzados ao longo da vida do maciço, são capazes de apresentar um panorama real sobre ele.

Um dos instrumentos mais utilizados nesse tipo de maciço, com elevado grau satisfatório, são os Marcos Superficiais (MS).

O objetivo da instalação dos marcos é o acompanhamento dos deslocamentos verticais e horizontais do maciço em relação a uma referência indeslocável (*Bench Mark*).



Figura 24 – Exemplo de MS Prisma com ponteira metálica no topo.



Figura 25 - Exemplo de MS Tubo com fita refletiva.

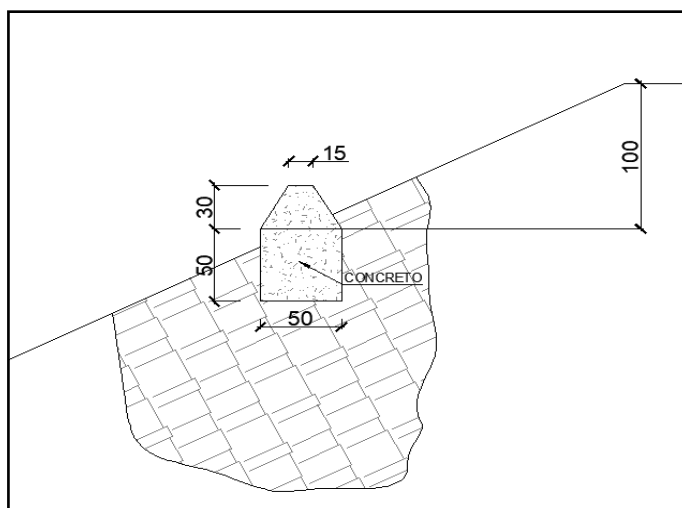
### 1.5.1 Marcos Superficiais

Marcos Superficiais são constituídos de estruturas simples, majoritariamente de concreto e elementos metálicos, em aço inox ou aço carbono galvanizado, que propiciam repetitividade de aferições, instaladas sobre a superfície das camadas do maciço, que, com auxílio de equipamento topográfico de precisão, são aferidos em períodos pré-determinados.

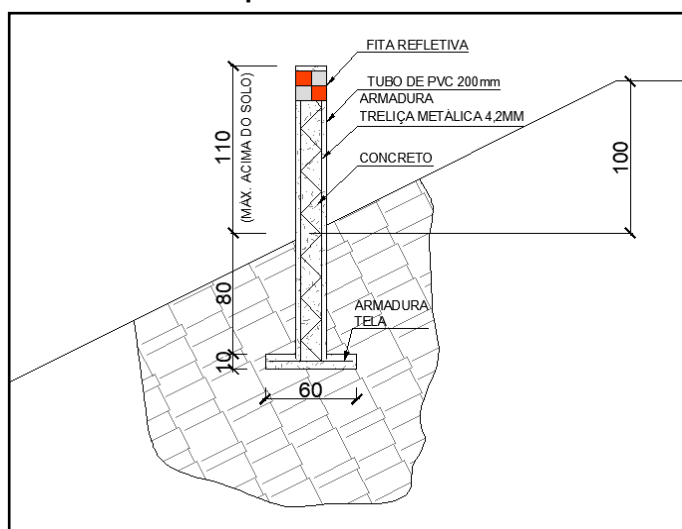
Os deslocamentos horizontais são medidos através de colimações geodésicas, enquanto os deslocamentos verticais (recalque) serão medidos através de nivelamento de precisão.

As leituras podem ser feitas através de estação total desde que o aparelho assegure precisão da ordem de  $\pm 3$  mm para distâncias da ordem de 400m. A equipe de leitura precisa estar apta para a atividade, para permitir, assim, leituras com esta precisão.

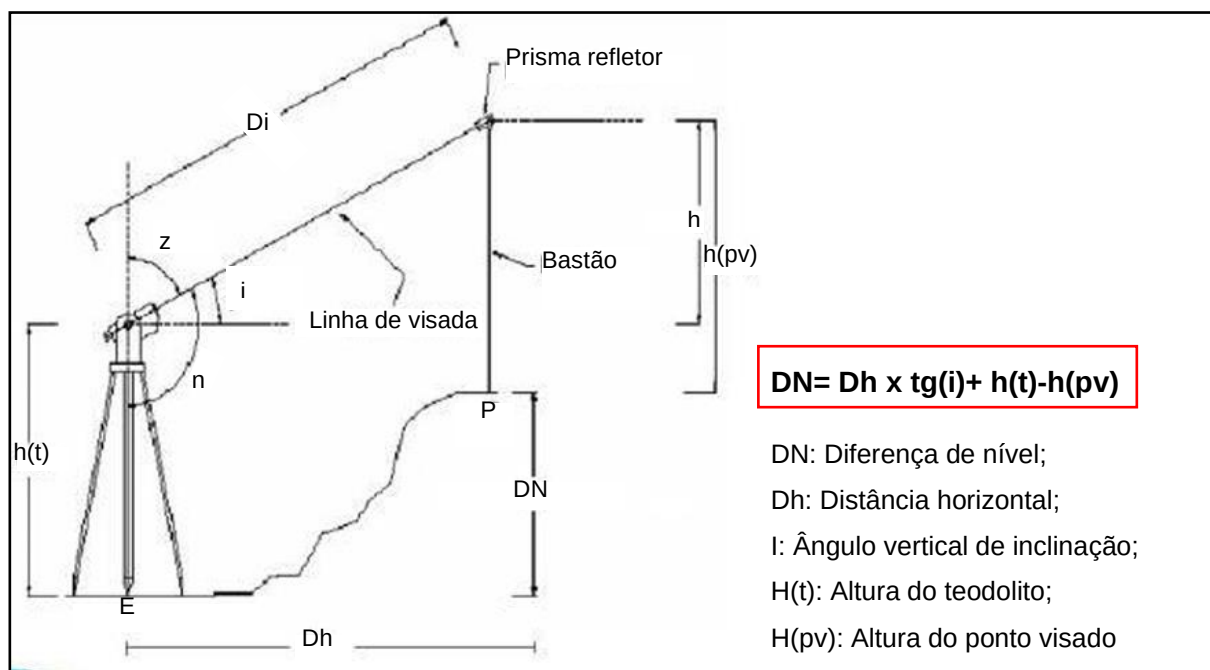
Os marcos são lidos posicionando-se a estação topográfica em local adequado, que permita a visão do MS, e assim, com base na referência indeslocável (BM), faz-se a leituras dos marcos superficiais existentes, normalmente utilizando-se de prisma de pequeno porte, aproximadamente similar ao esquema abaixo.



**Figura 26 – Detalhe de MS Prisma que receberá a ponteira metálica.**



**Figura 27 – Detalhe de MS Tubo com fita reflexiva.**



**Figura 28 – Modelo trigonométrico de aferição de marco superficial (IDD, 2022).**

Dessa forma, em posse das coordenadas x, y e z do instrumento, é possível compreender os recalques ocorridos naquele período, bem como sua direção de movimentação.

As principais vantagens deste sistema de monitoramento são o baixo custo, e a facilidade de instalação, manutenção e aferição. Como desvantagens podemos citar a necessidade de equipe de topografia, a possibilidade de variação/ imprecisão e a facilidade de danos, por acidentes ou vandalismo, uma vez que o instrumento fica exposto. Este, por sua vez, pode ser minimizado com estaqueamento ao redor do instrumento e instalação estratégica em local de menor risco.

## **1.6 Modelos de previsão de recalques de Aterros Sanitários**

Segundo Boscov (2008), a concepção de um modelo que considere todos os mecanismos relevantes, cujos parâmetros possam ser obtidos por ensaios de laboratório e observações de campo, não é tarefa fácil. Isso se deve a difícil missão de avaliar recalques finais em maciços de resíduos sólidos urbanos que são compostos por fases com comportamentos distintos.

Os modelos de previsão de recalque de aterros sanitários normalmente partem dos princípios da previsão para solos, considerando um mecanismo de adensamento unidimensional e realizam adaptações sob o ponto de vista do que cada autor

pretende abordar ou considera importante. Essas adaptações, no entanto, se apresentam com considerável nível de complexidade devido:

- Os índices de compressão primária e secundária são, no geral, em função do índice de vazios inicial, cujo valor em maciços de resíduos é variável e de difícil obtenção;
- As relações do tipo  $e$  vs.  $\log \sigma'$  ou  $e$  vs.  $\log t$  são frequentemente não lineares, implicando variação significativa dos índices de compressão  $C_c$  e  $C_\alpha$  em função das tensões geradas nos aterros sanitários;
- Os recalques primários são em função das tensões efetivas, que dependem do peso específico dos resíduos e dos níveis de líquidos percolados, parâmetros estes, igualmente, de difícil avaliação *a priori*.

A definição de um adequado modelo para previsão de recalques, assim como de seus parâmetros de cálculo, apresenta-se como principal fator limitante nas análises de deformabilidade dos aterros. Tal dificuldade decorre da interação de diferentes mecanismos como fluência e biodegradação no processo de compressão dos resíduos, os quais seguem leis próprias de comportamento e são governados por parâmetros distintos entre si. A proposição e utilização de métodos empíricos, formulados a partir da observação e interpretação de dados obtidos de aterros sanitários específicos, tem sido relatada por diversos autores.

Gourc *et al.* (1998) dividem os modelos para avaliação da deformabilidade dos resíduos sólidos em três grandes grupos:

- I. Os que consideram os recalques rápidos (primários) e os de longo prazo (secundário);
- II. Os que consideram somente os secundários, ou seja, modelos aplicáveis a aterros já encerrados;
- III. Os que consideram somente a parcela dos recalques secundários correspondente à biodegradação dos resíduos, não considerando, portanto, a componente mecânica (fluência) dos recalques de longo prazo.

Bosco (2008) destaca entre os modelos empíricos, os modelos de Yen e Scanlon (1975), de Gandolla *et al.* (1992) e Coumoulos e Koryalos (1997), devido a sua simplicidade, no entanto, alerta quanto a sua impossibilidade de previsão de recalque em projeto, pois necessitam de grande quantidade inicial de dados para

ajustar o modelo e para que os mecanismos relevantes estejam verdadeiramente representados.

Já entre os modelos teóricos, a autora defende que o modelo matemático de Zimmermam *et al.* (1977) é o mais acurado, que expressa mais fielmente todos os mecanismos envolvidos, entretanto, possui um grande número de parâmetros, com elevado número de elementos de difícil obtenção, o que limita sua aplicação prática, enquanto o modelo de Sowers (1973) é o mais aplicado, mesmo não considerando todos os componentes, devido a sua simplicidade e ao número de dados já armazenado na literatura especializada.

Um quadro resumo dos modelos unidimensionais de recalque de aterros sanitários foi apresentado por Catapreta (2008) e está disposto na Tabela 12.

**Tabela 12 – Modelos unidimensionais de recalques de aterros sanitários (CATAPRETA, 2008).**

| MODELO                                                                          |                    | PESQUISADOR                   |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Modelo Reológico                                                                |                    | EDIL <i>et al.</i> (1990)     |
|                                                                                 |                    | BLEIKER <i>et al.</i> (1995)  |
|                                                                                 |                    | CHEN E CHOU (1998)            |
| Método da Regressão                                                             | Função logarítmica | YEN E SCANLON (1975)          |
|                                                                                 |                    | EDIL <i>et al.</i> (1990)     |
|                                                                                 | Power creep law    | PUNYANMURTHULA (1995)         |
|                                                                                 |                    | ZHAO <i>et al.</i> (2001)     |
|                                                                                 | Função hiperbólica | LING <i>et al.</i> (1998)     |
|                                                                                 |                    | BJARNGARD E EDGERS (1990)     |
|                                                                                 | Função bilinear    | JESSEBERG E KOCKEL (11991)    |
|                                                                                 |                    | STULGIS <i>et al.</i> (1995)  |
|                                                                                 | Função multilinear | DEUSTSCH <i>et al.</i> (1994) |
| Modelos baseados em expressões semelhantes às da teoria de adensamento de solos |                    | SOWERS (1973)                 |
|                                                                                 |                    | YEN E SCANLON (1975)          |
|                                                                                 |                    | RAO <i>et al.</i> (1977)      |
|                                                                                 |                    | OWEIS E KHERA (1986)          |
|                                                                                 |                    | BJARNGARD E EDGERS (1990)     |
|                                                                                 |                    | EDIL <i>et al.</i> (1990)     |

| MODELO                   | PESQUISADOR                                               |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------|
|                          | LANDVA E CLARK (1990)                                     |
|                          | MORRIS E WOODS (1990)                                     |
|                          | WALL E ZEISS (1995)                                       |
|                          | DEUSTSCH <i>et al.</i> (1994)                             |
|                          | FASSET <i>et al.</i> (1994)                               |
|                          | BOUTWELL E FIORE (1995)                                   |
|                          | STULGIS <i>et al.</i> (1995)                              |
|                          | OURRY E PAGE (2005)                                       |
|                          | GOURC E OLIVEIR (2005)                                    |
| Modelos de Biodegradação | WALL E ZEISS (1995)                                       |
|                          | DIAZ <i>et al.</i> (1995) e ESPINACE <i>et al.</i> (1999) |
|                          | PARK E LEE (1997/2002)                                    |
|                          | EDGERS <i>et al.</i> (1992)                               |
|                          | SIMÕES (2000)                                             |
|                          | MARQUES <i>et al.</i> (2003)                              |

Apresenta-se a seguir uma síntese dos modelos propostos mais relevantes para avaliação de recalques de aterros sanitários.

#### 1.6.1 Modelo de Sowers (1973)

Trata-se da primeira proposta para avaliação de recalques de aterros sanitários propriamente dito. O autor adota um modelo baseado na teoria clássica de adensamento de Terzaghi da mecânica dos solos para RSU, sendo os recalques primários relacionados aos incrementos de carga e ocorrendo de forma rápida (menos de 1 mês). Quanto aos recalques de longo prazo, os quais incluem os fenômenos de fluência e biodegradação, o modelo admite a linearidade da relação recalque vs. logaritmo do tempo.

Os índices de compressibilidade primária ( $C_c$ ) e secundária ( $C_\alpha$ ), utilizados no modelo, são admitidos proporcionais ao índice de vazios inicial do material ( $e_0$ ) e variáveis em função da quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos e das condições ambientais presentes.



Os recalques primários ( $\Delta H_1$ ) e secundários ( $\Delta H_2$ ) são obtidos a partir das equações:

$$\Delta H_1 = H_0 \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0} \quad \text{Equação 1.4}$$

$$\Delta H_2 = H_0 \frac{C_\alpha}{1 + e_0} \log \frac{t_2}{t_1} \quad \text{Equação 1.5}$$

onde:

$\Delta H_1$  = recalque primário;

$\Delta H_2$  = recalque secundário;

$H_0$  = espessura inicial da camada;

$e_0$  = índice de vazios inicial;

$C_c$  = índice de compressão primária;

$C_\alpha$  = índice de compressão secundária;

$\sigma'_0$  = tensão efetiva vertical inicial no meio da camada;

$\Delta \sigma$  = acréscimo de tensão vertical no meio da camada;

$t_1$  = tempo inicial do período para obtenção do recalque secundário;

$t_2$  = tempo final do período para obtenção do recalque secundário.

#### 1.6.2 Modelo de Yen e Scanlon (1975)

Este modelo foi desenvolvido pelos autores de forma empírica a partir do monitoramento de três aterros sanitários da Califórnia (EUA) por um período de 9 anos. Estes aterros tinham altura de 6,0m a 38,0m, e nos resultados os autores observaram que a taxa de recalques decresce linearmente com o logaritmo do tempo.

Segundo Yen e Scanlon (1975), as observações desse modelo aplicam-se somente aos recalques de longo prazo (secundários). Os autores utilizam os parâmetros  $m$  e  $t_1$ , definidos, respectivamente, como a taxa de recalques e a idade média do aterro, e obtidos pelas equações:

$$m = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad \text{Equação 1.6}$$

$$t_1 = t - \frac{t_c}{2} \quad \text{Equação 1.7}$$

onde:

$m$  = taxa de recalque;

$\Delta H$  = recalque;

$\Delta t$  = intervalo de tempo entre leituras;

$t$  = tempo do início da construção;

$t_c$  = tempo de construção do aterro;

$t_1$  = idade média do aterro.

Nesta proposição, o período de construção do aterro sanitário, geralmente longo, deve ser levado em consideração na avaliação do comportamento do maciço. Essa determinação da idade média do aterro ( $t_1$ ) fica melhor apresentada na figura a seguir.



Figura 29 - Definição da idade média do aterro -  $t_1$  (YEN E SCANLON, 1975).

A partir desses estudos, os autores constataram que as taxas de recalques obtidas através do modelo decrescem com o tempo, tendendo a zero após 200 ou 300 meses. Essas observações, de acompanhamento de aterros desde suas fases iniciais também apontaram para relações não lineares entre a taxa de recalques e o logaritmo de tempo, quando os períodos são mais elevados que 10 anos.

Manassero *et al.* (1996, *apud.* MARQUES, 2001) observaram que o modelo de Yan e Scanlon (1975) apresentou taxas de recalques concordantes com as apresentadas por Sowers (1973). Os autores verificaram ainda uma tendência de

crescimento da taxa de recalque com o crescimento da altura do aterro, limitado, no entanto, a uma altura máxima a partir da qual as taxas de recalque não se alteram mais significativamente.

Em 1994, Sohn e Lee, a partir dos dados apresentados pelo modelo de Yen e Scanlon (1975), apresentaram estudo com a definição de duas constantes de relação linear,  $a$  e  $b$ , em função da altura do maciço, dessa forma, sintetizaram três equações para determinação da taxa de recalque em função da altura do aterro ( $Hf$ ) e da idade média dele ( $t_1$ ).

$$m = a - b \cdot \log t_1 \quad \text{Equação 1.8}$$

$$a = 0,00095 Hf + 0,0985 \quad \text{Equação 1.9}$$

$$b = 0,00035 Hf + 0,00509 \quad \text{Equação 1.10}$$

onde:

$a$  e  $b$  = parâmetros que variam com altura do aterro e o tempo de construção do maciço (mês);

$Hf$  = altura do aterro (m).

### 1.6.3 Modelo de Bjarngard e Edgers (1990)

O modelo criado por esses autores é composto pela análise de dados de observação e monitoramento de diversos aterros sanitários, representando, portanto, um método empírico de avaliação de recalques.

Nas observações, os autores identificaram que a evolução dos recalques ocorria em 3 fases, na fase inicial, de forma rápida pela compressão mecânica dos resíduos e redução dos vazios existentes. Já na segunda fase, compressão secundária intermediária, os recalques ocorriam por interações mecânicas, enquanto na terceira e última fase, compressão secundária de longo prazo, os efeitos da biodegradação dos resíduos eram acrescidos aos mecanismos anteriores, gerando taxas de recalque mais elevadas.

Os autores definiram valores de coeficientes de compressão secundária intermediária ( $C'_{\alpha 1}$ ) entre 0,003 e 0,038 e secundária de longo prazo ( $C'_{\alpha 2}$ ) entre 0,017 e 0,51, esses valores foram determinados com a aplicação do modelo. Ainda de acordo com os autores, nesse modelo, o índice de vazios, parâmetro de difícil

estimativa para os resíduos sólidos urbanos, não é considerado. A formula de descrição do modelo está apresentada a seguir:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = C_c \log \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0} + C_{\alpha 1} \log \frac{t_2}{t_1} + C_{\alpha 2} \log \frac{t_3}{t_2} \quad \text{Equação 1.11}$$

onde:

$\Delta H$  = recalque;

$H_0$  = altura inicial da camada;

$\sigma'_0$  = tensão vertical efetiva inicial no meio da camada;

$\Delta \sigma$  = acréscimo de tensão vertical no meio da camada;

$t_1$  = tempo para conclusão da compressão inicial (dias);

$t_2$  = tempo para conclusão da compressão intermediária (dias);

$t_3$  = tempo para o qual é feita a previsão do recalque (dias);

$C_c$  = coeficiente de compressão primária;

$C_{\alpha 1}$  = coeficiente de compressão secundária intermediária;

$C_{\alpha 2}$  = coeficiente de compressão secundária de longo prazo.

A Figura 30 apresenta um esquema representativo desse modelo.

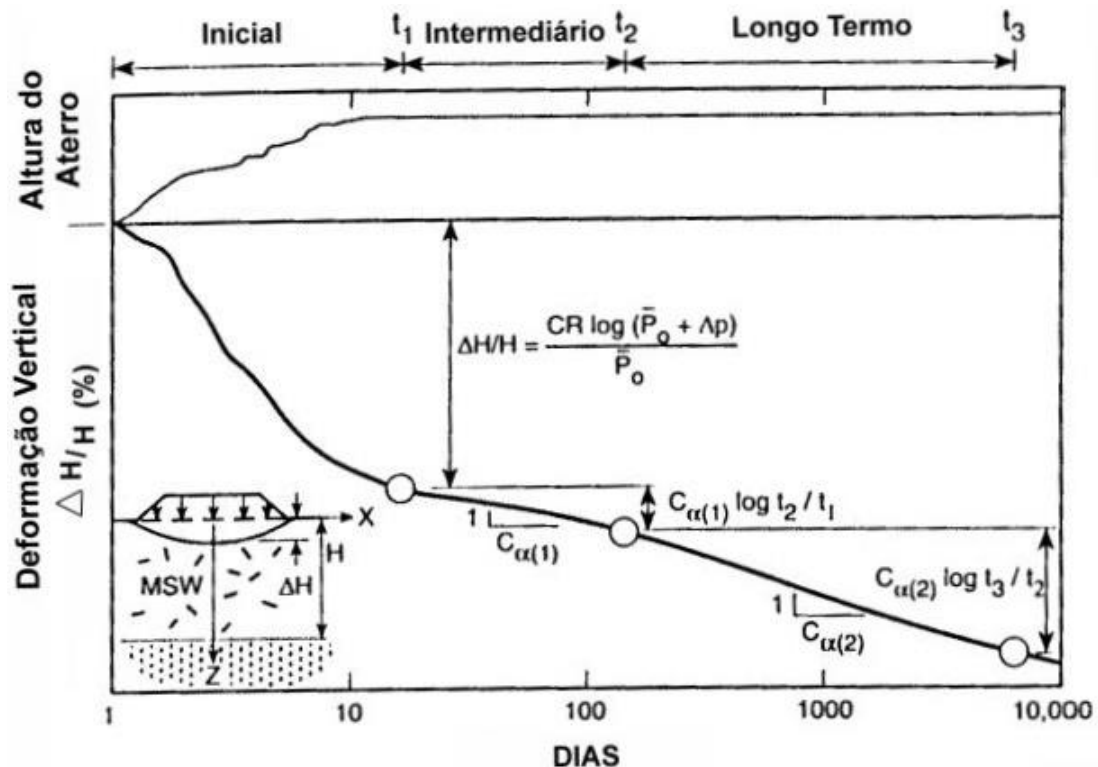


Figura 30 - Esquema representativo do modelo proposto por Bjarngard e Edgers (BJARNGARD E EDGERS, 1990).

Tapahuasco (2005, *apud*. TAPAHUASCO, 2009) demonstrou que este modelo apresenta resultados mais adequados para estimar recalques do que o modelo de Sowers (1973), no entanto, o autor destaca que o modelo carece de considerações devido a ter na sua base a teoria de consolidação, direcionada a solos, e portanto, considerar que os fatores de degradação têm comportamento homogêneo, o que pode representar um ponto de fragilidade para sua aplicação. Ele então, apresentou uma proposta de reformulação do modelo incluindo uma parcela de recalque referente a biodegradação. Esta parcela considera que, após certo tempo, a massa orgânica inicia o processo de transformação parcial em gás natural (fase metanogênica).

#### 1.6.4 Modelo de Gandolla *et al.* (1992)

Este modelo tem como base resultados de ensaios de consolidação em lisímetros, e foi aplicado a resíduos sólidos urbanos triturados submetidos apenas ao peso próprio e segundo os autores, apresentam boa concordância com equações exponenciais decrescentes. Dessa forma, estabeleceram:

$$\Delta H = H_0 a (e^{-kt} - 1) \quad \text{Equação 1.12}$$

onde:

$\Delta H$  = recalque;

$H_0$  = altura inicial da camada;

$a$  = constante de recalque unitário (definida pelos autores como 44,161);

$k$  = constantes de taxa de decomposição (definida pelos autores como 0,0077);

$t$  = tempo para o qual se deseja prever os recalques (meses).

#### 1.6.5 Modelo de Meruelo (1995)

Este modelo apresenta uma previsão de recalques baseado na degradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos e tem como intenção compreender os recalques que ocorrem num maciço de resíduos a partir dos parâmetros fundamentais que determinam os processos de degradação da fase anaeróbia, como: tempo, teor de matéria orgânica nos resíduos, umidade e ritmo de desenvolvimento dos processos de degradação.

O principal parâmetro adotado considera a hidrólise como fator limitante no processo de biodegradação. A hidrólise é um mecanismo frequentemente utilizado

pelos microrganismos para transformar compostos orgânicos complexos em compostos simples, tornando possível a obtenção de condições favoráveis à completa decomposição dos resíduos em diversos estágios. Da mesma forma que a taxa de geração de gases, a constante de hidrólise é um parâmetro que pode variar até quatro ordens de grandeza, dependendo principalmente das condições de umidade.

Os fenômenos de perda de massa e consequente perda de volume ao longo do tempo, podem ser associados aos recalques ( $\Delta H$ ) esperados, segundo a formulação proposta pelos autores:

$$\Delta H = \alpha H_0 COD \left[ 1 - \left( \frac{1}{k_h t_c} \right) (e^{-k_h(t-t_c)} - e^{-k_h t}) \right] \quad \text{Equação 1.13}$$

onde:

$\alpha$  = coeficiente de perda de massa que se transforma em recalque (0,12 a 0,50 (PALMA, 1995));

$H_0$  = altura inicial da camada;

$COD$  = quantidade de matéria orgânica biodegradável nos resíduos;

$k_h$  = coeficiente de hidrolisação ( $\text{dia}^{-1}$ ) – constante de equilíbrio químico, obtém-se a partir da concentração de um produto dividida pela concentração de reagente (0,0003 a 0,003  $\text{dia}^{-1}$  (PALMA, 1995));

$t_c$  = tempo de construção do aterro (dias);

$t$  = tempo para o qual se deseja prever os recalques (dias).

O parâmetro COD corresponde à fração orgânica biodegradável dos resíduos sólidos depositadas no aterro, na qual encontram-se resíduos que se degradam mais rapidamente que outros. Dessa forma, assume-se que metade da fração total degradará nos primeiros trinta anos, em função da qual estarão os principais recalques. No conhecido estudo do Aterro de Muribeca, por exemplo, a porcentagem total de matéria orgânica foi de 60% (0,60), logo, metade dará lugar aos recalques, assumindo-se como parcela de COD 0,30.

É importante ressaltar que este modelo é válido somente para a previsão dos recalques oriundos de compressão secundária devido a biodegradação dos resíduos, ou seja, de longo prazo, sob ação dos processos de decomposição.

### 1.6.6 Modelo de Coumoulos e Koryalos (1999)

Coumoulos e Koryalos (1999) apresentaram uma proposta para a previsão de recalques de longo prazo de aterros sanitários baseada na atenuação das taxas de deformação vertical que se verifica com o tempo, admitindo uma relação linear entre a compressão secundária e o logaritmo do tempo ( $\log t$ ), conforme apresentado a seguir:

$$\varepsilon = \left( \frac{\Delta H}{H} \right) = C_{\alpha} \log \left( \frac{t}{t_1} \right) \quad \text{Equação 1.14}$$

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \frac{0,434 C_{\alpha}}{t} \quad \text{Equação 1.15}$$

onde:

$\varepsilon$  = deformação secundária;

$\Delta H$  = recalque (m);

$H$  = altura da camada (m);

$C_{\alpha}$  = coeficiente de compressão secundária;

$t_1$  = tempo 1 decorrido após o encerramento do aterro (meses);

$t$  = tempo final decorrido após o encerramento do aterro (meses);

$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t}$  = taxa de deformação vertical.

O tempo inicial ( $t_0$ ), a partir do qual são estabelecidos os tempos  $t_1$  e  $t$ , corresponde ao encerramento do aterro sanitário. Analisando diversos resultados da literatura, os autores encontraram coeficientes de compressão secundária ( $C_{\alpha}$ ) variando entre 0,02 e 0,25, com a maioria apresentando valores próximos a 0,07.

### 1.6.7 Modelo de Oweis (2006)

Oweis (2006) desenvolveu um modelo que prevê recalques provenientes de processos mecânicos e biológicos. Este modelo propõe várias equações para condições distintas no aterro, como recalques devido ao peso das camadas subjacentes, recalques mecânicos devido ao processo de fluência (*creep*) sob tensão efetiva constante e recalques provenientes da perda de massa ou conversão de matéria orgânica em gás. O recalque mecânico durante o preenchimento do aterro é calculado por meio da Equação 1.16).

$$\Delta H_1 = 0,87 H_0 m' t_c C_c$$

*Equação 1.16*

onde:

$\Delta H_1$  = recalque primário;

$H_0$  = altura da camada projetada;

$C_c$  = índice de compressão em termos de deformação vertical;

$m'$  = taxa de preenchimento (aumento na espessura da camada/unidade de tempo);

$t_c$  = tempo para conclusão do preenchimento.

No tempo  $t_c$ , enquanto se preenche o aterro, o recalque estimado pelo *creep* é dado por:

$$H_{stc} = 0,435 C_{\alpha}' m' (1 + (t_c \ln(t_c)) - t_c)$$

*Equação 1.17*

onde:

$H_{stc}$  = recalque estimado pelo *creep* durante o preenchimento;

$C_{\alpha}'$  = índice de compressão secundária modificado em termos de deformação;

$m'$  = taxa de preenchimento (aumento na espessura da camada/unidade de tempo);

$t_c$  = tempo para conclusão do preenchimento.

Assumindo que o preenchimento se encerra no tempo  $t_c$ , o *creep* adicional se dará por:

$$\Delta H_{stc} = 0,435 H_0 C_{\alpha}' \ln \left( \frac{t}{t_c} \right)$$

*Equação 1.18*

onde:

$\Delta H_{stc}$  = recalque adicional devido ao *creep*;

$C_{\alpha}'$  = índice de compressão secundária modificado em termos de deformação;

$H_0$  = altura da camada projetada;

$t$  = tempo em dias ( $t_c < t$ );

$t_c$  = tempo para conclusão do preenchimento (dias).



Os recalques referente a parcela de decomposição biológica durante o preenchimento do aterro, são calculados a partir da seguinte equação:

$$H_d = \beta m' \left( t_c - \left( \frac{1}{k} \right) (1 - e^{-kt_c}) \right) \quad \text{Equação 1.19}$$

onde:

$H_d$  = recalque devido a decomposição no tempo  $t_c$ ;

$m'$  = taxa de preenchimento (aumento na espessura da camada/unidade de tempo);

$k$  = constante de decaimento durante o preenchimento;

$\beta$  = fração da massa de RSU com potencial de converter em gás;

$t_c$  = tempo para conclusão do preenchimento.

Já o recalque referente à decomposição biológica pós vida útil do aterro, é dado por:

$$\Delta H_{d(t>t_c)} = \beta H_0 \left( 1 - \left( \frac{1}{t_c k} \right) (1 - e^{-kt_c}) (1 - e^{-k'(t_{pc}-t_c)}) \right) \quad \text{Equação 1.20}$$

onde:

$\Delta H_{d(t>t_c)}$  = recalque devido a decomposição no tempo  $t_{pc}$  ( $t_{pc} > t_c$ );

$H_0$  = altura da camada projetada;

$k$  = constante de decaimento durante preenchimento;

$k'$  = constante de decaimento pós-preenchimento;

$\beta$  = fração da massa de RSU com potencial de converter em gás;

$t_c$  = tempo para conclusão do preenchimento;

$t_{pc}$  = tempo maior do que o preenchimento ( $t_{pc} > t_c$ ).

#### 1.6.8 Outros modelos

Alguns outros estudos e modelos para previsão de recalques em aterros sanitários têm sido registrados na literatura, sendo, no entanto, menos divulgados e utilizados, seja pela alta complexidade e muitas especificidades, seja pela necessidade de continuidade nas análises. A seguir é apresentada uma breve explanação sobre algumas dessas propostas.

O modelo de Zimmermam *et al.* (1977) é conhecido por ser um dos estudos mais completos e que envolve maior número de variáveis, mas é também bastante complexo. Trata-se de um modelo matemático baseado em duas equações, uma delas não linear. O modelo necessita de 5 parâmetros que precisam ser assumidos ou determinados através de ensaios. Em uma primeira parte do modelo, a equação geral da continuidade baseada na teoria das misturas é utilizada para representar o processo de dissipação das pressões neutras ao longo do tempo. Esta parcela inclui ainda os processos de degradação dos resíduos, simulados por uma lei exponencial de redução de massa. Os processos de fluência são simulados na outra parte do modelo, baseados na proposta de Murayama e Shibata (*apud*. ZIMMERMAM *et al.*, 1977). Este modelo foi aplicado e mostrou boa aderência com os resultados de ensaios laboratoriais de consolidação unidimensional de resíduos sólidos urbanos triturados, não havendo registro de sua aplicação em aterros sanitários.

Simões (2000), Marques (2001), Marques *et al.* (2003) e Tapahuasco (2009) desenvolveram modelos com o objetivo de simular o comportamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, levando em consideração os efeitos da decomposição biológica.

Machado *et al.* (2002) propuseram a utilização de um modelo constitutivo para resíduos sólidos urbanos baseado em ensaios laboratoriais triaxiais e ensaios de compressão confinada em grande escala. Dellabianca *et al.* (1999) apresentaram análises numéricas usando software de elementos finitos e adotando um modelo de fluência de solo mole (*soft soil creep*) para representar resíduos sólidos urbanos em uma célula do aterro sanitário de Brasília.

Ademais, Hossain e Gabr (2005) apresentaram um modelo de previsão de assentamento que quantifica a mudança nas características do material com base na taxa de degradação dos resíduos. Devido à biodegradação, a massa sólida orgânica é convertida em gás, levando a uma diminuição do índice de vazios e consequente aumento da deposição de resíduos. O modelo foi desenvolvido com base em ensaios de laboratório e comparado com recalques observados em diversos aterros sanitários nos Estados Unidos.

Já Liu *et al.* (2006) utilizaram a teoria de consolidação não saturada, levando em consideração os processos de biodegradação, para prever recalques em longo prazo de aterros sanitários. Os autores incluíram equações de pressão de gás no modelo, e a validação dele foi realizada no estudo de 6 células de teste.

Um modelo baseado em conceitos de estado crítico e incorporando os efeitos do *creep* e biodegradação foi criado por Babu *et al.* (2010) para prever a compressão total de aterros sanitários sob incremento de carregamento ao longo do tempo. Dados disponíveis em literatura, bem como ensaio de laboratório de compressão e triaxial foram utilizados para determinação dos parâmetros adotados no modelo e os resultados registrados apresentaram a mesma ordem de grandeza de outros modelos que consideram as três componentes dos recalques, mecânico, *creep* e biodegradação.

Em 2010, Chen *et al.* compartilharam os resultados de um estudo sobre o comportamento da biodegradação durante a compressão de resíduos sólidos urbanos. Eles conduziram experimentos que envolveram sistemas de controle de temperatura, recirculação de percolado, aplicação de carga e sistemas de coleta de líquido e gás. Os autores propuseram um modelo unidimensional que estima a capacidade e os recalques de aterros em condições ideais de biodegradação. Esse modelo fornece uma estimativa das capacidades de aterramento e dos recalques esperados considerando um processo de biodegradação.

No mesmo ano, Pauzi *et al.* (2010) reviram vários modelos constitutivos apresentados na literatura para recalques em aterros sanitários e descrevem um modelo combinado, aplicado a aterros de resíduos na Malásia, no qual identificou como melhor base de aplicação e adaptação o Modelo de Sowers (1973), que se configura até os dias atuais como o modelo mais utilizado por projetistas e consultores do setor. Estes autores, por sua vez, defendem que o futuro dos modelos de previsão de recalques deve utilizar modelos probabilísticos associados a modelagens numéricas. A tecnologia de computadores e softwares tornando possível prever com precisão os recalques, sem abster-se da necessidade de validação com dados.

### **1.7 Aplicações recentes de modelos de previsão de recalque de aterro sanitários**

A produção científica sobre resíduos sólidos tem aumentado ao longo das últimas décadas. De acordo com Mendez (2021), em 1993, foram publicados cerca de 200 artigos científicos no âmbito internacional, em 2012 esse número se aproximou de 1700 publicações. No Brasil, no entanto, de 2003 a 2006 foram verificados menos de 30 artigos, chegando a 80 em 2013. Quando se limita essa pesquisa a produções acerca da estimativas de recalques, esse número é ainda mais restrito. Dessa forma, como parte da revisão da literatura do presente trabalho, realizou-se uma revisão de

publicações científicas nacionais relevantes dos últimos 14 anos (2010-2024) que utilizaram métodos de previsão de recalque de aterros sanitários, e as principais observações estão apresentadas a seguir.

Silva (2010) apresenta a aplicação do modelo unidimensional desenvolvido por Simões (2000) e de modelos bidimensionais elásticos linear e não linear (hiperbólico) para avaliação de recalques em um aterro de Belo Horizonte. No modelo de Simões, os deslocamentos verticais desmembrados em duas componentes (mecânica - devido à aplicação de sobrecargas; biológica - resultado de processos de biodegradação dos resíduos). Os modelos bidimensionais elásticos utilizam parâmetros da teoria da elasticidade e possibilitam a modelagem de deslocamentos horizontais e não incorporam a parcela dos recalques resultantes dos processos de biodegradação. O autor concluiu que o modelo unidimensional apresentou bons resultados para avaliação dos deslocamentos verticais, com somente 5 dos 28 instrumentos apresentando diferença superior a 30% entre os valores aferidos e os calculados. Os modelos bidimensionais elásticos, no entanto, não forneceram resultados satisfatórios para a previsão dos recalques de longo prazo. Para o ganho de vida útil durante a fase de preenchimento, os resultados foram satisfatórios. O autor destacou ainda a importância da consideração do tempo entre a construção das camadas e o início do monitoramento de recalques. Quando considerado tal aspecto, foi obtido comportamento mais uniforme em relação às deformações verticais.

Um estudo apresentado por Denardin (2013) comparou resultados obtidos a partir de cálculos realizados através de modelos de previsão de recalque disponíveis na literatura (Modelo de Yen e Scanlon (1975); Modelo Hiperbólico de Ling *et al.* (1998); Modelo de Creep de Edil *et al.* (1990); Modelo de Bjarngard e Edgers (1990) e Método Observacional de Asaoka (1978)) com aqueles dados aferidos em 6 marcos superficiais da Central de Resíduos do Recreio (RS). Como conclusão a autora destacou que a aplicação original do Modelo de Yen e Scanlon (1975), apresentou resultados insatisfatórios, no entanto, os modelos propostos por Ling *et al.* (1998) e Bjarngard e Edgers (1990) apresentaram boa aderência com os dados de monitoramento.

Em Farias (2014) apresenta-se uma análise do comportamento da compressibilidade em maciços de resíduos sólidos urbanos realizada a partir de estudos experimentais e estatísticos em um aterro de Campina Grande, para realizar ajustes dos dados de quatro modelos de previsão teóricos (Sowers (1973),

Logarítmico de Yen e Scanlon (1975), Hiperbólico de Ling *et al.* (1998) e Simões (2000)). O estudo previu diversas etapas desde construção de célula experimental até o monitoramento de seu comportamento, e para verificação do melhor ajuste dos modelos de recalque foi utilizado o método iterativo de Gauss-News para funções não lineares. Este método inicia-se arbitrando valores aos parâmetros, cada coeficiente de regressão obtido representa a diferença entre os verdadeiros parâmetros da regressão e das estimativas iniciais. Assim, os coeficientes obtidos representam uma correção que deve ser feita nos coeficientes iniciais e tem como propósito ajustar o modelo. A partir dos resultados obtidos, a autora observou que as características dos resíduos influenciaram de forma direta nos recalques resultantes, que foram da ordem de 25% em relação à altura inicial em 2 anos, bem como concluiu pela adequabilidade do uso do método em comparação com os dados medidos no campo, conferindo confiança de 95%. O modelo de Sowers apresentou resultados semelhantes aos do monitoramento até o 500º dia, se apresentando inferior após esse período. Por outro lado, o modelo original de Yen e Scanlon apresentou estabilização dos recalques aos 550 dias, e a autora destacou o que outros autores como Catapreta (2008) já haviam observado, que esse modelo sem simplificação não responde bem às análises de recalque a partir de dados de monitoramento.

O estudo de Teixeira (2015) realizado em dois aterros do Sul do Brasil (São Leopoldo e de Minas do Leão), verificou a eficiência de cinco modelos de previsão de recalques em aterros sanitários de RSU existentes na literatura (modelo de Yen e Scanlon (1975), Exponencial de creep (Potência) de Edil *et al.* (1990), Bjarngard e Edgers (1990), Reológico de Gibson e Lo (1961), Gandolla *et al.* (1992), Hiperbólico de Ling *et al.* (1998), Meruelo (1995) e o Método Observacional de Asaoka (1978)). Os recalques observados no aterro de Minas do Leão corresponderam a uma deformação entre 4% e 24% em relação à altura inicial dos resíduos e no aterro de São Leopoldo, os recalques observados variaram entre 1% e 16,5% da altura inicial de resíduos. A partir das análises realizadas neste trabalho, foi possível verificar que os modelos mais adequados para a previsão de recalques nos dois aterros sanitários analisados foram os modelos Hiperbólico de Ling *et al.*, Exponencial de Edil *et al.*, Bjarngard e Edgers, Meruelo e o Gibson e Lo, que obtiveram boa aderência entre os valores medidos e previstos. A autora destacou que o método de Asaoka (1978) foi interessante para verificar a estabilização e previsão do recalque final.

Elk *et al.* (2017) e Corrêa (2017) analisaram a compressibilidade dos resíduos do antigo vazadouro da Marambaia (Rio de Janeiro), que operou entre 1987 e 2003, quando foi encerrado e remediado. Os estudos foram elaborados a partir de dados de monitoramento de recalque superficial aferidos de 2008 a 2015. Os modelos utilizados foram Sowers (1973), Meruelo (1995), Ling *et al.* (1998) e Oweis (2006). Os resultados apresentaram deformações na faixa de 0,16 a 0,41% em relação à altura inicial do maciço, com os modelos Sowers, Meruelo e Ling *et al.* apresentando valores relativamente próximos, evidenciando que podem ser usados para prever recalques em longo prazo. O modelo de Oweis foi considerado o mais complexo dos modelos analisados e o que apresentou valores de recalques mais elevados e distantes dos demais, diferente do modelo de Sowers considerado o mais simples de aplicar.

Nessa mesma direção, Klink (2019) analisou a previsão de recalques a longo prazo (50 anos) a partir dos dados de monitoramento de campo da Central de Tratamento de Resíduos Nova Iguaçu (RJ) à luz dos modelos de Sowers (1973), Gandolla (1994), Ling *et al.* (1998), Meruelo (1995) e Oweis (2006). Esse estudo, que apresentou recalques da ordem de 0,48% a 1,30%, indicou resultados semelhantes para os modelos de Sowers, Ling *et al.* e Meruelo, com estabilização dos recalques previstos a partir de 2000 dias. Por outro lado, os modelos de Gandolla e Oweis apresentam um comportamento destacado, com previsões de recalques elevados, com o primeiro atingindo estabilização com aproximadamente 8000 dias e o segundo não atingindo a estabilização para o período analisado, similar ao que foi observado no estudo anterior. A partir dos resultados obtidos, a autora concluiu que quando se pretende prever recalques futuros e dispõe-se de poucos dados aferidos, é preferível aplicar um método mais simples em detrimento daquelas mais complexos, onde se torna necessário adotar parâmetros que podem diferir da condição particular do local investigado.

O estudo desenvolvido por Nebenzahl (2019) por sua vez, apresenta um enfoque não no recalque dos resíduos, mas no efeito do recalque do solo de fundação do aterro na estrutura do maciço sanitário. Este trabalho utilizou como base o caso de um aterro situado no município de Capela de Santana (RS). As investigações do subsolo foram avaliadas de modo a definir as seções estratigráficas de análise da fundação para definir as áreas mais críticas quanto ao recalque. A ferramenta computacional SIGMA foi empregada para realizar simulações para obter a deformação vertical da fundação e analisar os recalques diferenciais em face ao

aterro. Foi observado que as regiões com maior deformação da superfície coincidiram com as áreas onde uma camada de solo residual de arenito era mais espessa e a sobrecarga maior. O autor concluiu que as magnitudes dos recalques diferenciais não são significativas para o comportamento do maciço de resíduos.

Um estudo realizado por Salamoni (2019) apresentou resultados da análise do comportamento de compressibilidade de RSU baseado em ensaios e monitoramentos realizados em um aterro de Santa Maria (RS). O desenvolvimento foi feito a partir do estudo da relação entre a evolução dos recalques com os aspectos mecânicos, biodegradativos e climáticos, para isso foram utilizados métodos matemáticos, reológicos, métodos baseados na mecânica dos solos e métodos que levam em conta a biodegradação. A autora destacou que, em relação aos modelos matemáticos, precisam de uma série de dados medidos, e quando extrapolados não apresentam consistência. Os modelos propostos por Ling *et al.* (1998) hiperbólico, logarítmico e potência apresentaram concordância, com boa aproximação dos dados de campo. O mesmo pode ser observado nos modelos de Gibson e Lo (1961), Bjarngard e Edgers (1990), Meruelo (1990), Gandolla *et al.* (1992), Marques (2001) e Park e Lee (2002), O modelo de Chen *et al.* (2010), no entanto, apresentou resultados sutilmente inferiores. Entre os modelos analisados, o proposto por Gourc *et al.* (2010) foi considerado o mais prático, pois necessidade de poucos parâmetros e apresentou elevado desempenho

Rison (2021) utilizou dois aterros sanitários (Muribeca e Belo Horizonte) para avaliação de três modelos de previsão de recalque: Tapahuasco (2009), Meruelo (1995) e Bjarngard e Edgers (1990). Segundo a autora, os resultados obtidos foram satisfatórios, validados através de uma correlação linear. O modelo de Meruelo obteve melhor desempenho, seguido do modelo o modelo de Bjarngard e Edgers e por fim do modelo de Tapahuasco. O estudo destaca que este último modelo apresentou uma grande versatilidade quando comparado aos outros modelos, possibilitando a estimativa de recalques iniciais não registrados e, prevendo recalques sob efeitos de acréscimos de cargas e biodegradabilidade.

Diferente das maioria dos estudos anteriores que adotou modelos tradicionais de previsão de recalques de aterros sanitários da literatura, Gomes *et al.* (2021) apresenta o desenvolvimento de modelos de regressão linear múltipla objetivando a estimativa de recalques diferenciais para áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos. Um aterro de pequeno porte foi projetado, construído e monitoramento por

441 dias no município de Presidente Lucena (Sul do Brasil). Este estudo incluiu medições de marcos superficiais, monitoramentos físicos, químicos e biológicos do lixiviado gerado e a análise de dados das condições climáticas da região. O modelo gerado apresenta o recalque como variável dependente e as concentrações de DQO e de sólidos suspensos voláteis do lixiviado como as variáveis independentes, em outras palavras, consiste na obtenção de uma equação que tenta explicar a variação da variável dependente pela variação do nível da variável independente. O  $R^2$  ajustado foi de 0.698; considerando um nível de confiança de 95%.

O avanço em inteligência artificial atingiu a realidade do cotidiano das pessoas e, atualmente, pesquisadores utilizam das possibilidades dessa ferramenta para desenvolver soluções para diversos desafios. Um artigo publicado por Souza *et al.* (2020) apresenta o que pode ser um próximo passo na contribuição para a estimativa de recalques de maciços de resíduos sólidos urbanos. Segundo os autores, um modelo computacional baseado em redes neurais artificiais (RNA) foi aplicado em estudos por diversos países visando prever a geração de RSU em um período futuro, com base em dados passados. Ressalta-se que redes neurais artificiais visam simular o funcionamento dos neurônios e têm capacidade de aprender e reconhecer padrões, em ciclos de treinamento chamados denominados de aprendizado de máquina. Com base nesses dados e em ciclos de aprendizado (treinamento), validação e testes, os modelos seriam capazes de reconhecer padrões e correlações e, assim, prever com razoável exatidão a geração futura de resíduos. Os resultados obtidos indicam que os modelos baseados em RNA apresentaram boa sensibilidade na previsão da geração de RSU, revelando-se potencial solução para uso aplicado em ações de planejamento e gerenciamento.

Dentre essas novas alternativas, o presente estudo propõe a utilização do Teorema de Bayes (a seguir), baseado nos conceitos de probabilidade e estatística para redução das incertezas nesse processo de estimativa de recalques em maciços sanitários.

## **1.8 Teorema de Bayes**

Os métodos probabilísticos possibilitaram a correção da falta de unicidade entre fator de segurança e segurança propriamente dita, ainda prevalecente nos métodos deterministas e mesmo em métodos semiprobabilísticos. Duas situações que



apresentem um mesmo fator de segurança podem ter probabilidade de ruptura muito diferente, portanto, riscos muito distintos

Através do uso desses métodos, é possível calcular uma medida que guarda uma correspondência única e mais adequada, do ponto de vista conceitual, para mensurar a segurança das estruturas e obras de obras de terra: a probabilidade de ruína.

O Teorema de Bayes é um conceito fundamental da teoria da probabilidade e da estatística. Ele fornece um método para calcular probabilidades condicionais, ou seja, a probabilidade de um evento ocorrer, dado que outro evento já ocorreu.

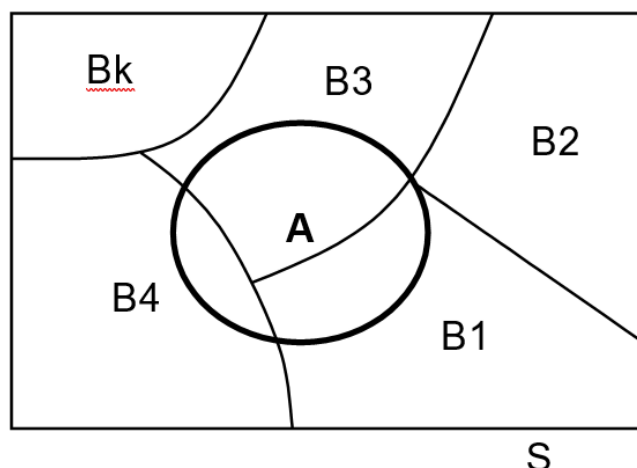
O teorema foi formulado pelo matemático e estatístico inglês Thomas Bayes, embora tenha sido desenvolvido e publicado pelo matemático francês Pierre-Simon Laplace e é frequentemente utilizado para atualizar probabilidades com base em novas evidências.

O teorema de Bayes é particularmente útil quando se trabalha com informações incompletas ou incertas. Ele permite atualizar probabilidades iniciais com base em novos dados ou evidências, ajudando a tomar decisões mais embasadas.

Bekman e Costa (1980, *apud*. SANTOS, 2007) definem que o Teorema de Bayes possibilita uma revisão de probabilidades decorrentes de um novo estado de informação. Os referidos autores informam ainda que essa revisão de probabilidades é natural e intuitiva, citando o seguinte exemplo:

[...]Todos nós temos uma opinião a respeito, por exemplo, do evento “amanhã será um dia chuvoso” e teremos condições de externar essa opinião em termos probabilísticos. Digamos que, em nossa opinião, a probabilidade de “amanhã ser um dia chuvoso” seja de 30%. É claro que esse número mudará profundamente se ligarmos o rádio e ouvirmos o locutor informar: “A pior frente fria dos últimos meses se encontra agora a apenas 50 quilômetros de distância.”[...].

O Teorema de Bayes, conforme apresentado em Benjamin e Cornell (1970), admite que os eventos  $B_1, B_2, \dots, B_k$  do Diagrama de Venn formem uma partição do espaço amostral  $S$ , ou seja, tais eventos são mutuamente excludentes e que exaurem todas as possibilidades de resultados (coletivamente exaustivos). Na ocorrência de um evento  $A$  qualquer (Figura 31), o Teorema de Bayes possibilita recalculas as probabilidades de cada um dos eventos que constitui o espaço amostral.



**Figura 31 – Esquema do Teorema de Bayes a partir da ocorrência de um evento qualquer A (SANTOS, 2007).**

Esse cálculo se dá a partir da seguinte expressão:

$$P\left(\frac{B_i}{A}\right) = \frac{P(A/B_i) \times P(B_i)}{\sum_{j=1}^k P(A/B_j) \times P(B_j)} \quad \text{Equação 1.21}$$

onde:

$P\left(\frac{B_i}{A}\right)$  = a probabilidade condicional de ocorrência do evento  $B_i$ , dado que o evento A ocorreu - probabilidade posterior (*a posteriori*);

$P\left(\frac{A}{B_i}\right)$  = a probabilidade condicional de ocorrência do evento A, dado que o evento  $B_i$  ocorreu – nova informação (verossimilhança);

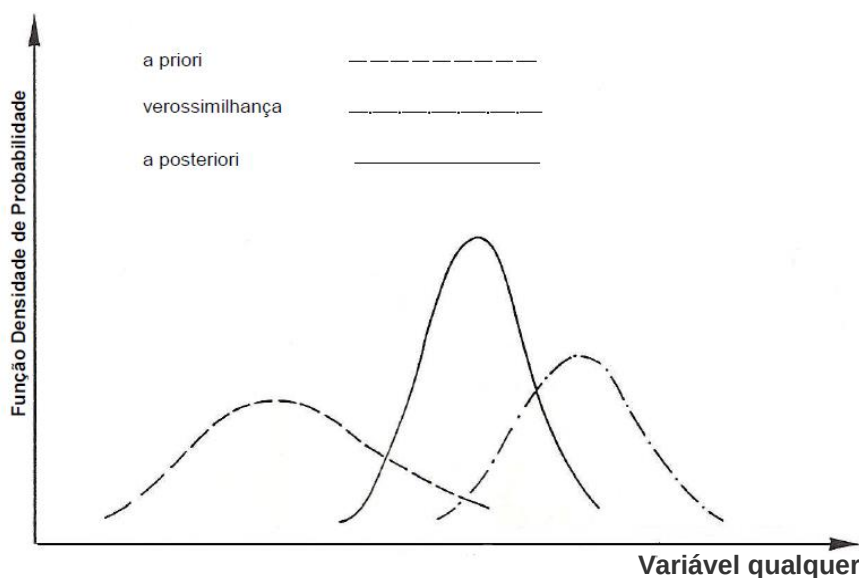
$P(B_i)$  = a probabilidade de ocorrer o evento  $B_i$  - probabilidade anterior (*a priori*);

$\sum_{j=1}^k P(A/B_j) \times P(B_j)$  = fator de normalização ou ponderação - expressão entendida como uma média ponderada.

Dessa forma, os autores mostram ainda que o Teorema de Bayes pode ser apresentado como o produto de três fatores, em que  $\theta$  é o parâmetro de interesse:

$$\left(\begin{matrix} \text{Probabilidade} \\ \text{posterior de } \theta \end{matrix}\right) = \left(\begin{matrix} \text{Constante de} \\ \text{normalização} \end{matrix}\right) \left(\begin{matrix} \text{Função de} \\ \text{Verossimilhança} \end{matrix}\right) \left(\begin{matrix} \text{Probabilidade} \\ \text{anterior de } \theta \end{matrix}\right)$$

Dessa forma, o enfoque de Bayes assume que os parâmetros de distribuição probabilística utilizadas são variáveis randômicas. 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 32 – Relação entre as distribuições *a priori*, a função de verossimilhança e a distribuição *a posteriori* (adaptado de CABRAL, 2008).**

Pacheco (2007) reportando-se a Harr (1987) e Ang e Tang (1984), destaca que o Teorema de Bayes se apresenta muito útil em aplicações de Engenharia. No entanto, normalmente, as variáveis de interesse da engenharia geotécnica assumem valores dentro de um intervalo no domínio dos números reais, ou seja, são classificadas como variáveis contínuas (características mensuráveis que assumem valores em uma escala contínua (na reta real), para as quais valores fracionais fazem sentido) e não variáveis discretas (característica quantitativa, uma vez que ela é usada para representar quantidades de um determinado elemento) como previsto na equação inicial.

Por este motivo, muitas vezes o geotécnico recorre ao conhecimento de *experts* e correlações para estabelecer valores para parâmetros de interesse. Conhecimentos e correlações que podem ser um tanto quanto subjetivos e por isso, precisam ser avaliados.

Paulino *et al.* (2003, *apud.* SANTOS, 2007) informam que, com base num celebre tratado de Raiffa e Schaifer (1961), é possível determinar que a seleção de uma distribuição *a priori* para modelagem probabilística de um fenômeno deve ser feita com base nos seguintes requisitos:

- Versatilidade para acomodar o maior número possível de crenças *a priori*;
- Acessibilidade interpretativa para facilitar o processo de sumarização dos seus membros;
- Simplicidade de derivação analítica da distribuição *a posteriori*.

Esse tipo de distribuição é denominado Distribuição Conjugada, e tem a característica de gerar uma distribuição posterior do mesmo tipo da distribuição *a priori*.

Desse modo, a Equação 1.21 reduz-se a simples relações algébricas entre as estatísticas amostral (por exemplo, média e variância amostral) e os parâmetros das densidades anteriores e posterior (matematicamente conhecidos como hiperparâmetros, para distingui-los dos parâmetros sobre os quais se deseja fazer as inferências estatísticas).

A seguir estão apresentados resumos de algumas das principais distribuições conjugadas utilizadas na inferência bayesiana, com indicação de seus principais parâmetros, bem como seus comportamentos subjacentes, forma de obtenção de média e variância e por fim, a atualização estatística posterior.

Tabela 13 – Resumo de algumas distribuições conjugadas normalmente utilizadas na inferência bayesiana (adaptado de SANTOS, 2007).

| COMPORTAMENTO DO FENÔMENO SUBJACENTE              | PARÂMETRO | DISTRIBUIÇÃO ANTERIOR E POSTERIOR                                                                                               | MÉDIA E VARIÂNCIA DO PARÂMETRO            | ESTATÍSTICAS POSTERIORES                                                                           |
|---------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Binomial                                          | $\theta$  | Beta                                                                                                                            | $E(\theta) = \frac{q}{q+r}$               | $q'' = q' + x$                                                                                     |
| $P_X(x) = \binom{n}{x} \theta^x (1-\theta)^{n-x}$ |           | $f_\theta(\theta) = \frac{\Gamma(q+r)}{\Gamma(q)\Gamma(r)} \theta^{q-1} (1-\theta)^{r-1}$                                       | $Var(\theta) = \frac{qr}{(q+r)^2(q+r+1)}$ | $r'' = r' + n - x$                                                                                 |
| Exponencial                                       | $\lambda$ | Gama                                                                                                                            | $E(\lambda) = \frac{k}{v}$                | $v'' = v' + \Sigma x$                                                                              |
| $f_X(x) = \lambda e^{-\lambda x}$                 |           | $f_\lambda(\lambda) = \frac{v(v\lambda)^{k-1} e^{-v\lambda}}{\Gamma(k)}$                                                        | $Var(\lambda) = \frac{k}{v^2}$            | $k'' = k' + n$                                                                                     |
| Normal (com $\sigma$ conhecido)                   | $\mu$     | Normal                                                                                                                          | $E(\mu) = \mu_\mu$                        | $\mu_\mu'' = \frac{\mu_\mu' (\sigma^2/n) + \bar{X} \sigma_\mu'^2}{(\sigma^2/n) + (\sigma_\mu')^2}$ |
| $X \sim N(\mu, \sigma)$                           |           | $f_M(\mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\mu} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\mu - \mu_\mu}{\sigma_\mu} \right)^2 \right]$ | $Var(\mu) = \sigma_\mu^2$                 | $\sigma'' = \sqrt{\frac{(\sigma')^2 (\sigma^2/n)}{(\sigma')^2 + (\sigma^2/n)}}$                    |
| Poisson                                           | $\mu$     | Gama                                                                                                                            | $E(\mu) = \frac{k}{v}$                    | $v'' = v' + t$                                                                                     |
| $P_X(x) = \frac{(\mu.t)^x}{x!} \exp[-\mu.t]$      |           | $f_M(\mu) = \frac{v(v\mu)^{k-1} e^{-v\mu}}{\Gamma(k)}$                                                                          | $Var(\mu) = \frac{k}{v^2}$                | $k'' = k' + x$                                                                                     |

Lacasse *et al.* (1991) defendem que a previsão do comportamento de fundações não pode ser feita com exatidão face às variações espaciais das propriedades do solo, deficiências nas investigações geotécnicas, restrição dos modelos de cálculo, incertezas nos parâmetros do solo e nas cargas atuantes. Os referidos autores destacam sobre a necessidade de adoção de enfoques de projetos racionais e bem documentados que permitam informar e levar em conta as incertezas na parametrização. A análise de confiabilidade possibilita o mapeamento e avaliação das incertezas, aplicando de maneira conveniente ações para mitigar eventuais problemas.

Dessa forma, baseando-se no Teorema de Bayes, os autores desenvolveram as equações abaixo, considerando o comportamento normal para as distribuições conjugadas (apresentadas anteriormente), que permitem o cálculo da estimativa do valor esperado e da variância da resistência atualizada do solo durante a cravação de estacas (*a posteriori*), em função do valor esperado e da variância da estimativa *a priori* e do valor esperado e da variância da função de verossimilhança.

$$\mu_Q = \frac{\sigma_Q^{2L} \cdot \mu_Q^P + \sigma_Q^{2P} \cdot \mu_Q^L}{\sigma_Q^{2L} + \sigma_Q^{2P}} \quad \text{Equação 1.22}$$

$$\sigma_Q^2 = \frac{\sigma_Q^{2L} \cdot \sigma_Q^{2P}}{\sigma_Q^{2L} + \sigma_Q^{2P}} \quad \text{Equação 1.23}$$

onde:

$\mu_Q$  = valor esperado obtido *a posteriori*;

$\mu_Q^P$  = valor esperado para dado obtido *a priori*;

$\mu_Q^L$  = valor esperado para o dado obtido pela função de verossimilhança;

$\sigma_Q^{2L}$  = variância da distribuição em função de verossimilhança;

$\sigma_Q^{2P}$  = variância da distribuição *a priori*;

$\sigma_Q^2$  = variância atualizada da distribuição *a posteriori*.

Uma maneira de avaliar a qualidade da atualização obtida pela teoria de Bayes é através do Indicador de Falha “D”. Ele representa a diferença entre a estimativa pela função de verossimilhança e a obtida *a priori*, normalizada em relação à raiz quadrada da soma das variâncias adquiridas pela função de verossimilhança e pela estimativa *a priori* (GUTTORMSEN, 1987).

$$D = \frac{\mu_Q^L - \mu_Q^P}{\sqrt{\sigma_Q^{2L} + \sigma_Q^{2P}}} \quad \text{Equação 1.24}$$

Guttormsen (1987, *apud*. PINTO, 2018) define que os resultados de “D” podem ser entendidos de tal forma:

- Valores de D iguais a zero indicam que a estimativa *a priori* e a obtida da função de verossimilhança são iguais. Neste caso, a atualização somente poderá reduzir a estimativa *a posteriori* da variância;
- Valores de D entre -1,5 e +1,5 indicam uma atualização satisfatória da resistência mobilizada;
- Valores de D positivos indicam que a estimativa *a posteriori* será superior àquela obtida *a priori*;
- Valores de D negativos indicam que a estimativa *a posteriori* será inferior àquela obtida *a priori*.

Aplicado inicialmente às estacas *offshore* analisadas por Guttormsen (1987), Cabral (2008) foi o primeiro a verificar, em sua pesquisa, a qualidade da atualização de algumas estacas *onshore* executadas no Rio de Janeiro, Brasil. Desde então, a metodologia vem sendo expandida para novos cenários e situações, como pode ser observado na Tabela 13.

Assim, esta pesquisa propõe a aplicação da metodologia a estudos de recalques ocorridos em maciços de resíduos sólidos urbanos, associada a resultados obtidos a partir de instrumentação geotécnica (marcos superficiais).

**Tabela 14 – Resumo de dados e procedimentos realizados em bibliografia relacionada à formulação de Lacasse baseada na Análise Bayesiana fora do seu contexto inicial *offshore* (adaptado de SILVA, 2023).**

| TRABALHO         | INSTRUMENTO                                                                                                         | REGIÃO/ ESTRATIGRAFIA                                                                                                                                                                                                                                                                              | DADO A PRIORI                                                                                            | DADO DE VEROSSIMILHANÇA                                                                       | PARÂMETRO DE AVALIAÇÃO “D”                                                                                            |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CABRAL (2008)    | 19 estacas pré-moldadas de concreto, com diâmetros entre 26cm e 50cm e comprimento cravado variando entre 15 e 34m. | Zona oeste do Rio de Janeiro (RJ) / Argila orgânica mole nos primeiros 10 metros passando a areia e silte mais competente em seguida.                                                                                                                                                              | Décourt e Quaresma e U.S. Corps of Engineering baseados em 2 perfis típicos interpretados das sondagens. | Método GRLWEAP aplicado em 19 estacas com ECD.                                                | 17 das 19 estacas se apresentaram dentro do limite de D=1,5.                                                          |
| SILVA (2015)     | 20 estacas raiz com comprimento de 45,6m.                                                                           | Área portuária de Rio Grande (RS) / Primeiros 20m, em média, camada com predominância de areia fina compacta; de 20m a 35m de profundidade, uma camada de argila média a rija e, até 50m, uma camada de areia muito compacta.                                                                      | Aoki e Velloso, Décourt e Quaresma, Velloso e U.S. Corps of Engineering baseados em 4 SPTs.              | Extrapolção da curva carga <i>versus</i> recalque de 20 PCEs.                                 | Não foi feita análise do parâmetro D.                                                                                 |
| NIETIED T (2018) | 645 estacas metálicas tipo H com comprimentos de cravação variando entre 13,5m e 21,5m.                             | São Gonçalo (RJ), às margens da Baía de Guanabara / Aterro com até 1,0m. Camada de argila mole superficial com espessura de 8 a 12m. Abaixo camada de solo arenoso sedimentar muito compacto, com espessura variando de 4 a 7m, assente sobre solo areno-siltoso/silto-arenoso residual de gnaíse. | Aoki e Velloso e Vesic baseados em 46 SPTs.                                                              | Fórmula Dinamarquesa (nega) e Chellis-Aoki (repique), ambos aplicados em mais de 600 estacas. | Não foi feita análise do parâmetro D.                                                                                 |
| PINTO (2018)     | 30 estacas pré-moldadas de concreto, diâmetro 33cm, comprimento cravado variando entre 4,5m e 14,5m.                | Zona oeste do Rio de Janeiro (RJ) / Camadas variáveis de sedimentos de 2m a 7m seguido de solo residual de origem gnáissica, até cerca de 17m.                                                                                                                                                     | Aoki e Velloso, Décourt e Quaresma e Velloso baseados em 24 SPTs e 9 sondagens rotativas.                | Análise CAPWAP de 30 ECDs.                                                                    | Predomínio de resultados dentro da faixa de $\pm 1,5$ , com o método de Velloso apresentando os melhores indicadores. |



| TRABALHO      | INSTRUMENTO                                                                                                                                                                                                                                                                          | REGIÃO/ ESTRATIGRAFIA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | DADO A PRIORI                                                                                                                                   | DADO DE VEROSSIMILHANÇA                                                                | PARÂMETRO DE AVALIAÇÃO "D"                                                                                                                                                                                               |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PASSOS (2019) | 31 estacas pré-moldadas metálicas seção tubular, sendo 11 com área de 52,4cm <sup>2</sup> e 20 com área de 67,6cm <sup>2</sup> e comprimento cravado entre 24 e 31m.                                                                                                                 | Baixada Fluminense (RJ) / camada de argila mole de origem flúvio marinha, com espessura bastante variável, na faixa de 2,0m até 14,0m, sobrejacente a solo residual de gnaíse.                                                                                                                                                                                                                  | Aoki e Velloso e método $\beta$ baseados no perfil geotécnico típico que consta no projeto do empreendimento (não se teve acesso às sondagens). | Fórmula Dinamarquesa (nega), Aoki (repique) e método GRLWEAP aplicados nas 31 estacas. | Não foi feita análise do parâmetro D.                                                                                                                                                                                    |
| LIMA (2022)   | 5 estacas metálicas tipo "H" com comprimento cravado até o impenetrável (entre 6,2m e 8,0m).                                                                                                                                                                                         | Zona oeste do Rio de Janeiro (RJ) / Camada de aterro com aproximadamente 1m sobrejacente a uma camada de argila siltosa de consistência variável e cerca de 4,5m de espessura. Sob essa camada se encontra uma areia compacta com espessura de cerca de 1m. O impenetrável a percussão foi alcançado em profundidades entre 6,2m e 8,0m. A sondagem mista indicou se tratar de rocha granítica. | Aoki e Velloso, Décourt e Quaresma e Velloso.                                                                                                   | Análise CAPWAP de 5 ECDs.                                                              | Todos Positivos. Somente o método de Velloso esteve dentro da faixa ideal (1,5).                                                                                                                                         |
| SILVA (2023)  | 10 estacas de 20,0 metros selecionadas de banco de dados de 15 estacas metálicas tubulares com embutimento variando entre 9,5 e 30,0 metros total de 31 ensaios (11 imediatamente após execução das estacas; 10 após uma semana e mais 10 após duas semanas da execução das estacas) | Municípios de Óbidos e Juruti (PA) / Planície de inundação do rio Amazonas cujo perfil estratigráfico mostrou constante alternância de materiais de baixa e alta granulometria. As investigações geotécnicas indicaram solo de muito baixa resistência a profundidades da ordem de 30,0 metros                                                                                                  | Aoki e Velloso com contribuição de Monteiro, Aoki e Velloso e Decourt e Quaresma                                                                | Análise CAPWAP de 15 ECDs em diferentes espaços de tempo                               | Para o período logo após a cravação os valores se encontraram dentro da faixa ideal ( $\pm 1,5$ ). Considerando os períodos de uma e duas semanas após a cravação (set up) os valores de "D" extrapolaram a faixa ideal. |

### 1.8.1 Anatomia das previsões

Além de participar de previsões de custos de construção e impacto ambiental, o engenheiro geotécnico prevê muitos aspectos do desempenho das diversas instalações e estruturas. O profissional que atua com resíduos sólidos urbanos, sobretudo, é condenado e abençoado igualmente devido à importância das previsões e pela dificuldade de fazê-las com precisão. Como vistos nas seções anteriores, esses materiais, influenciados por processos naturais, são muito variáveis e apresentam um comportamento muito complexo.

Uma previsão diz respeito a algum evento que ainda vai acontecer e implica, portanto, futuro. O engenheiro, por exemplo, pode prever a magnitude da deformação que uma estrutura sofrerá em uma data específica no futuro ou ainda prever a natureza de uma situação existente, mas invisível.

O engenheiro geotécnico é geralmente forçado a trabalhar com informações insuficientes e imprecisas enquanto tenta determinar e delinear a situação real, portanto, deve determinar o mecanismo envolvido para selecionar um método estimativo adequado e meios de determinação dos parâmetros envolvidos.

Segundo Lambe (1973), um método muito simples e comumente utilizado de previsão é a extrapolação. Plotando dados em relação ao tempo pode-se continuar sua trama no futuro para obter uma previsão, usa escalas logarítmicas para encontrar as parcelas, e essas escalas escondem parte da dispersão de dados.

Manipular os parâmetros com o método selecionado para obter uma previsão geralmente apresenta certa dificuldade. Definições de parâmetros geralmente resultam de vários ciclos de plotagem, estudo, replotagem etc. Os componentes individuais do processo de previsão raramente são etapas isoladas discretas.

Ao considerar as previsões, Lambe (1973) classifica-as da seguinte forma:

**Tabela 15 – Classificação de previsões (adaptado de LAMBE, 1973).**

| TIPO DE PREVISÃO | QUANDO A PREVISÃO É FEITA | RESULTADO NO MOMENTO DA PREVISÃO |
|------------------|---------------------------|----------------------------------|
| A                | Antes do evento           | -                                |
| B                | Durante o evento          | Desconhecido                     |
| B1               | Durante o evento          | Conhecido                        |
| C                | Depois do evento          | Desconhecido                     |
| C1               | Depois do evento          | Conhecido                        |

Uma previsão de recalque do tipo A, por exemplo, seria feita antes da construção e baseada inteiramente em dados disponíveis naquele momento. Uma previsão de recalque do tipo B seria feita durante a construção e teria dados disponíveis obtidos durante as partes iniciais da construção, como medições feitas durante a escavação, construção de fundações, etc. O desfecho do evento previsto pode ser desconhecido (tipo B) ou conhecido (tipo B1). A previsão do tipo C é aquela feita após a ocorrência do evento previsto.

Existem muitos outros tipos de previsões, exemplos dos quais são previsões em que o projetista tem informações privilegiadas e previsões em que ele tem algum controle sobre o resultado. Muitas vezes, uma "suposição" é uma previsão com pouca ou nenhuma base. Além disso, uma "surpresa" pode resultar de previsões imprecisas ou da ausência de uma previsão.

Para que se faça o melhor uso de um processo previsão é necessário entender todo o processo. A abordagem para entender e melhorar um processo é dissecar seus componentes e, em seguida, melhorar cada um deles. Dessa forma são feitas as previsões adotadas ao longo desse estudo, podendo ser classificadas como do tipo B1, porque utiliza-se dados de eventos em curso, recalques dos maciços de resíduos medidos em campo, para realizar previsões dos avanços desses recalques e para isso, as parcelas e parâmetros envolvidos são analisados, estudados e definidos.

#### 1.8.2 Aplicação da teoria bayesiana na estimativa de recalques

A questão da incerteza em projetos geotécnicos não é atual e foi trazida por Terzaghi em 1936, na qual apontam que os riscos são inerentes a qualquer projeto e que devem ser explicitamente reconhecidos, como forma de encontrar um equilíbrio.

Posteriormente, Peck (1969) introduziu as bases do que se conhece por "*observational method*", um dos marcos referenciais da Engenharia Geotécnica, reconhecendo explicitamente a incerteza dos modelos teóricos.

No entanto, enquanto em diversos campos da engenharia já se faz uso dos conceitos de probabilidade aplicada há algum tempo, na geotecnia ambiental, embora se reconheça implicitamente que à toda estrutura está associada uma probabilidade de sucesso ou mal comportamento, não há a incorporação explícita disso em projeto, qual seja, pela consideração expressa de um valor numérico para a probabilidade e mensuração de eventos.

O evento de recalque de um maciço de resíduo essencialmente heterogêneo sob efeito das mesmas condições e características constitui-se um evento raro, ou seja, associado a pequenas probabilidades. Assim sendo, a proposição de um modelo probabilista com base na inferência clássica, debruçada sobre a teoria da amostragem, implicaria na necessidade de amostras com tamanhos economicamente inviáveis, haja vista que toda a informação seria obtida tão somente da própria amostra.

Com base nessa realidade, torna-se evidente a vantagem do uso da Estatística Bayesiana na avaliação, correção e previsão de recalques de maciços sanitários. Essa abordagem permite levar em consideração o grau de convicção prévio sobre o parâmetro a ser estimado, por meio da inclusão de uma distribuição *a priori* subjetiva do parâmetro. É essa distribuição *a priori* que possibilita a incorporação de argumentos físico-dedutivos em modelos de probabilidade.

A instrumentação é o meio pelo qual o (a) engenheiro (a) verifica a aderência do modelo de cálculo adotado em relação às condições reais da obra, observando, dentro de uma faixa coerente de valores, se os resultados verificados na obra corroboram com aqueles obtidos no modelo. Certamente são de grande valia para obras de aterro sanitários, por permitir, além de maior acurácia na previsão em projeto, a reavaliação ao longo da vida útil do empreendimento.

### 1.8.3 Determinação de recalque *a priori*, função de verossimilhança e *a posteriori*

O presente item exemplifica a metodologia proposta pela Teoria de Bayes para redução de incerteza na verificação e atualização da previsão de recalque para maciços de resíduos sólidos. Conforme já destacado anteriormente, os Capítulos 3, 4 e 5 apresentam a referida metodologia aplicada a um estudo de caso de unidade de aterro sanitário de Pernambuco (BR).

Com base nos resultados de recalques previstos pelos métodos clássicos/teóricos para a seção destacada como distribuição *a priori* e do banco de dados de histórico de leituras de marcos superficiais durante anos utilizado como função de verossimilhança, o Teorema de Bayes possibilitará a obtenção da distribuição *a posteriori*.

## **2 ESTUDO DE CASO**

O presente capítulo apresenta a localização, propriedades básicas do empreendimento, caracterização geológica da região, caracterização geotécnica a partir de sondagens de simples reconhecimento e outros ensaios, tipologia e características dos instrumentos de aferição de recalques implantados e selecionados para análise nesse estudo.

O aterro sanitário aqui apresentado será denominado Unidade 01 para fins de simplificação e preservação da identidade do empreendimento, que tem caráter privado e autorizou a utilização dos dados.

### **2.1 Histórico do empreendimento**

Antes da implantação da Unidade 01, um aterro ao lado do empreendimento recebia, diariamente, cerca de 2.800 toneladas de resíduos domésticos, hospitalares e industriais, e atendia aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes. Desativado no final da primeira década dos anos 2000, este representava o maior vazadouro do estado e funcionava desde 1985, inicialmente como um lixão, sem técnicas adequadas de operação, controle e segurança, e, posteriormente, como um aterro controlado, buscando a sua recuperação operacional, de segurança e ambiental.

A primeira célula de disposição do aterro sanitário teve suas operações iniciadas em 2007 e recebeu cerca de 10.000.000 toneladas 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 toneladas de resíduo até o terceiro mês de 2019. A partir desse momento a unidade passou pelo processo de unificação e sobreposição

A Figura 33 mostra uma foto de satélite do referido empreendimento, com destaque para as suas duas células de resíduos já unificadas e para o aterro controlado vizinho, ao norte.



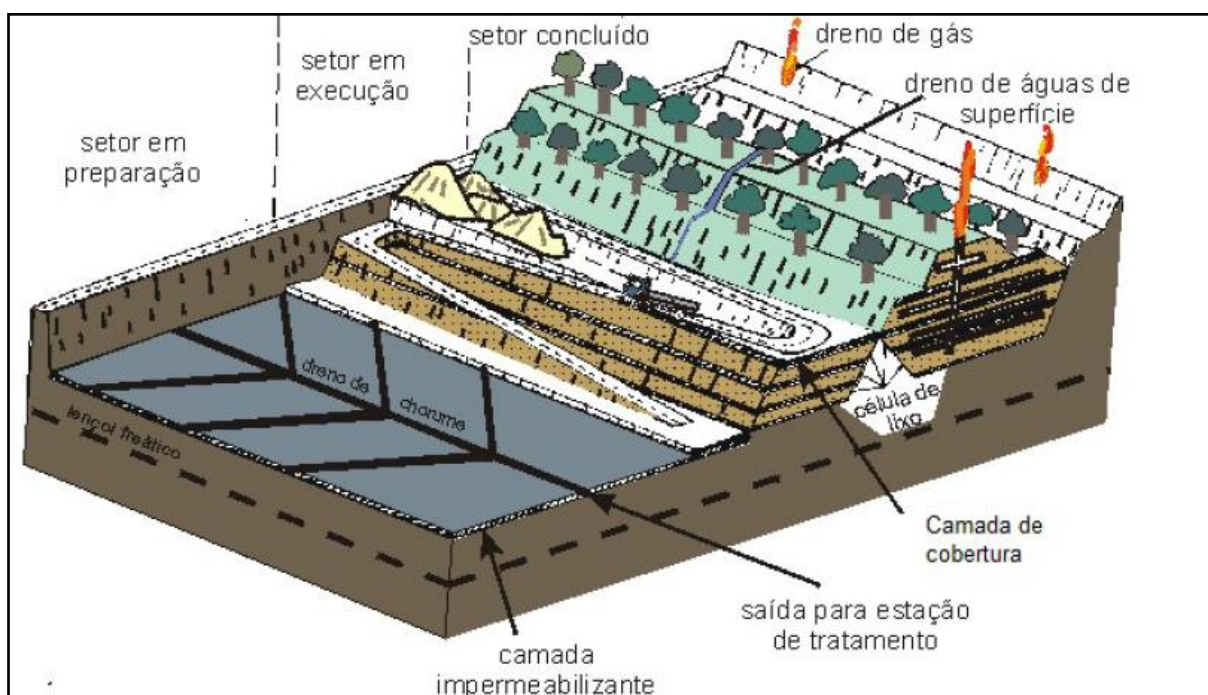
**Figura 33 – Foto de satélite do maciço de resíduos da Unidade 01 (GOOGLE EARTH).**

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

O processo de recebimento, espalhamento e compactação dos resíduos se inicia com a pesagem do caminhão na balança ao entrar (e sair) na unidade, com indicação assim da massa recebida. A partir dos acessos, tanto periféricos quanto internos (sobre resíduos), o veículo chega à praça de disposição (local estrategicamente definido para disposição dos resíduos, com largura mínima para realização de manobras dos veículos, seguindo uma sequência de avanço definida em projeto), onde orientado pela equipe de campo da central de tratamento de resíduos, o transportador deposita os resíduos coletados para serem espalhados, ao passo que são também compactados pelo maquinário específico (a saber: trator de esteiras, auxiliado por escavadeiras, retroescavadeiras e por vezes, rolos compactadores).

Conforme descrito no 1.3.2, o maquinário espalha e compacta o material em finas camadas, dando aprox. cinco passadas sobre cada uma delas. Esse trajeto de espalhamento e compactação não deve ser muito longo (<30m) em vista da busca por melhor eficiência com menor consumo de combustível. Esse processo é repetido até a formação dos chamados alteamentos, que atingem nessa unidade aproximadamente 6m de altura, e são intercalados por bermas de equilíbrio de 5m de largura. Os taludes externos desses alteamentos são conformados com declividade de 2(H):1(V), padrão definido como seguro para maciços de resíduos, considerando parâmetros de estabilidade e fator de segurança mínimo (1,5 – ideal; 1,1 – atenção).

Ao atingir a altura desejada, o alteamento é coberto com uma camada de aproximada 0,50m de solo de jazida local. Essa camada de solo é retirada nos locais onde vão ocorrer novas disposições, possibilitando que os resíduos sejam interligados entre si (favorável à estabilidade), bem como facilitando o escoamento dos líquidos gerados no interior do maciço até os dispositivos de drenagem horizontal construídos tanto na base do maciço, quanto na base de cada alteamento, e conectados verticalmente por drenos verticais, que seguem um padrão rigoroso de construção para cumprir essa função. Um detalhe esquemático desse processo está apresentado a seguir.



**Figura 34 - Esquema de um aterro sanitário - diversas fases (IPT,2018).**



Nas Figura 35 e Figura 36 são apresentadas imagens de satélite extraídas da ferramenta Google Earth, ilustrando o progresso da unidade, com imagens antes da implantação do empreendimento e das fases iniciais de operação das células. De modo a facilitar a visualização e entendimentos, traçou-se um contorno (linha amarela) englobando a área da Unidade 01.



**Figura 35 – Fase inicial da operação na Célula I (GOOGLE EARTH, 2007).**



**Figura 36 - Fase inicial da operação na Célula II (GOOGLE EARTH, 2015).**

## 2.2 Localização do empreendimento

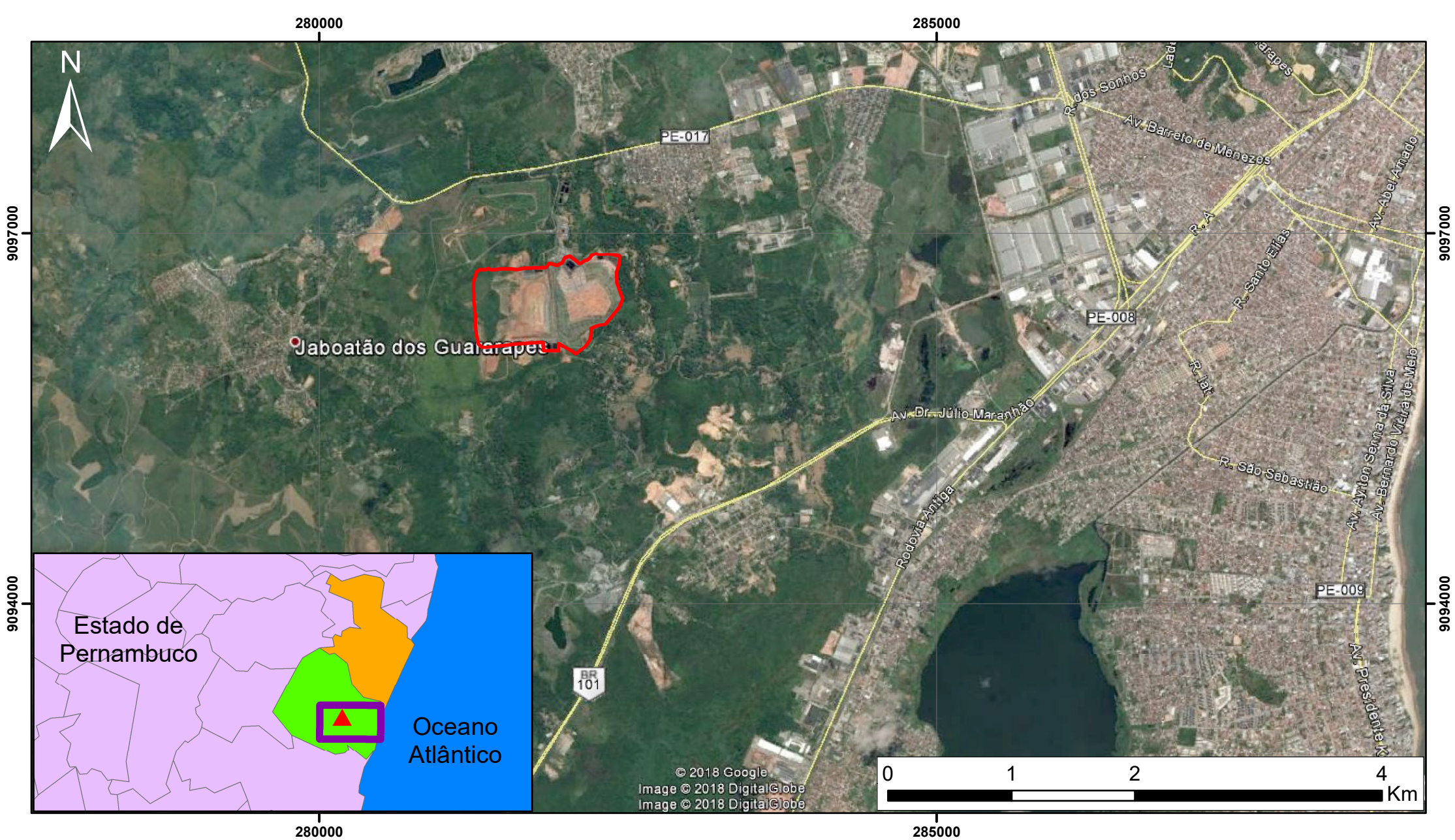
A Unidade 01 se situa no Município de Jaboatão dos Guararapes, ao sul da capital do Estado de Pernambuco, Recife, sendo incluída em sua região metropolitana. O principal acesso se dá pela rodovia estadual PE-017, mais conhecida como Eixo de Integração Prazeres Jaboatão, vide figura a seguir. Destaca-se que o empreendimento está localizado a cerca de 7km a oeste das praias da região, 5km a noroeste da Lagoa Olho d'Água e 200m a oeste do Rio Jaboatão.



**Figura 37 – Principais acessos externos ao aterro sanitário (GOOGLE MAPS, 2018).**

A Figura 38 mostra um mapa de localização da Unidade 01 inserida na região do entorno.





| Legenda                                                                                                                                                                                                          | Título                                                           | Escala   | Fonte        | Datum          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------|--------------|----------------|
| <div> <div></div> <div>Unidade 01</div> </div> <div> <div></div> <div>Área projetada em mapa</div> </div> <div> <div></div> <div>Recife</div> </div> <div> <div></div> <div>Jaboatão dos Guararapes</div> </div> | <div>Figura 38 -</div> <div>Mapa de</div> <div>Localização</div> | 1:40.000 | Google Earth | UTM WGS-84 25S |

## 2.3 Geologia e hidrogeologia

Conforme exposto no mapa geológico da Figura 39, elaborado com base no Mapa de Geodiversidade do Estado de Pernambuco, confeccionado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2006a)<sup>4</sup>, o substrato da área em estudo se localiza predominantemente sobre rochas e solos residuais provenientes do Complexo Belém do Francisco, com a presença de Depósitos Aluvionares nas proximidades dos corpos d'água localizados a norte e leste da unidade 01.

O Complexo São Francisco, inserido no Terreno Pernambuco Alagoas, é composto por rochas de origem metamórfica intensamente dobradas, com predomínio de gnaisses ortoderivados que podem conter porções migmatíticas. Esta litologia condiciona rochas com marcantes diferenciações locais de comportamentos geomecânicos e hidráulicos, descontinuidades que podem gerar superfícies preferenciais de percolação de fluidos, ou o desprendimento de blocos e placas em taludes de corte.

Os solos residuais desta unidade tendem a apresentar textura argilo-siltico-arenosa, sendo pobres em nutrientes (baixa fertilidade natural) e ricos em alumínio (solos ácidos). No que tange à erosividade, esta varia de moderada nos solos residuais bem evoluídos a alta nos pouco evoluídos. Adicionalmente, estes solos tendem a apresentar boa capacidade de suporte, formando terrenos normalmente adequados para fundações de obras de grande porte.

Os depósitos aluvionares são constituídos de sedimentos cenozóicos depositados em meio aquoso com pouca ou nenhuma consolidação. Suas características apresentam amplas variações locais, uma vez que dependem do regime de deposição em questão. Esta unidade pode ainda englobar materiais de diversas texturas, contudo, é comum que seja constituída por areias e cascalhos, com camadas subordinadas de argilas de planície de inundação e meandros abandonados.

Entre os limitantes possivelmente condicionados pelo desenvolvimento de atividades de engenharia sobre estes depósitos, podem ser citadas a possibilidade da presença de matéria orgânica em excesso, prejudicando o uso do solo como material

---

<sup>4</sup> CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Mapa Geodiversidade do Brasil: Influência da geologia dos grandes geossistemas no uso e ocupação dos terrenos. Brasília: CPRM, 2006a.

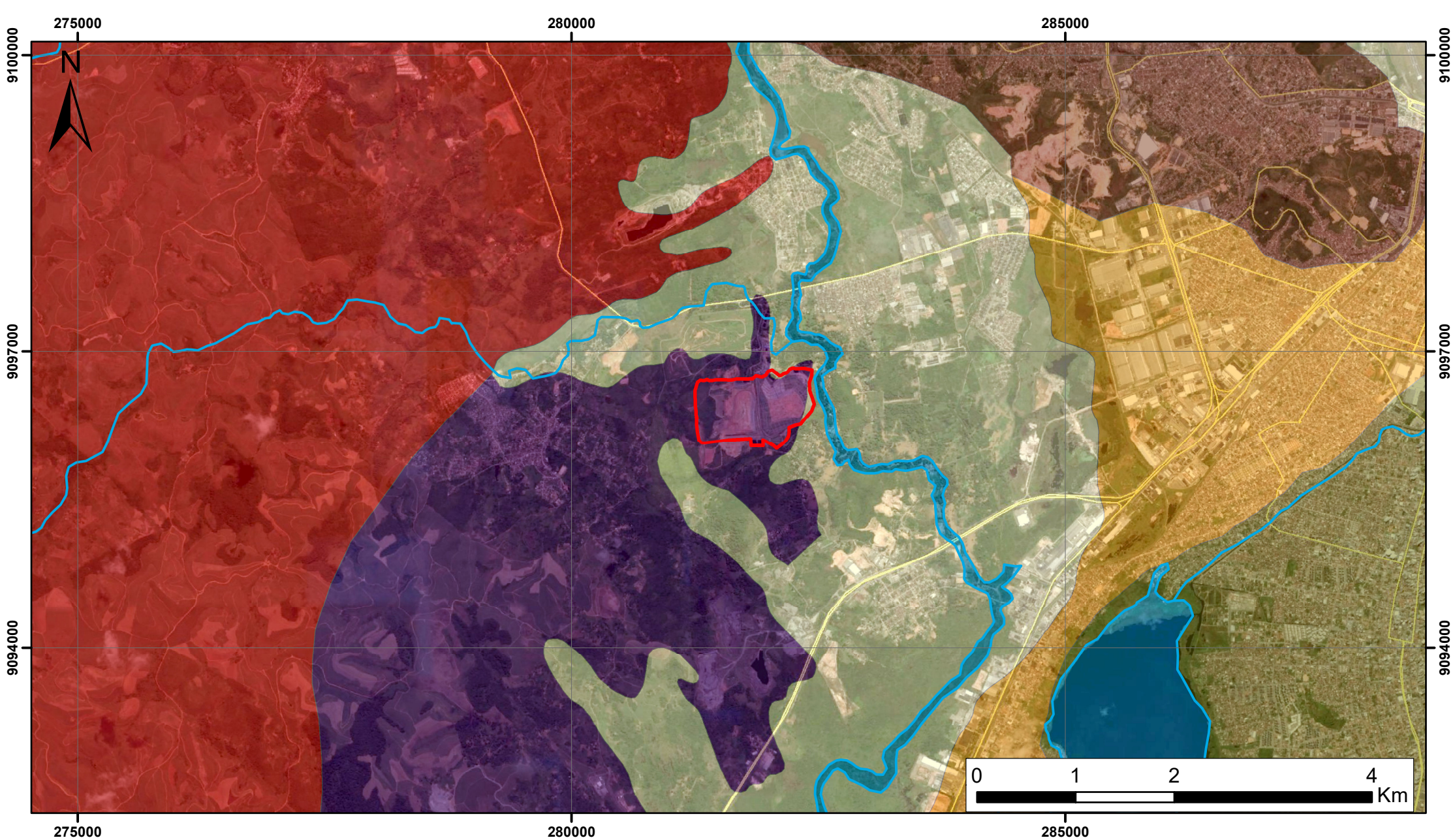
de empréstimo, a possível existência de substâncias corrosivas a equipamentos e obras enterradas, assim como a possibilidade de ocorrência de solos com baixa capacidade de suporte, tais como argilas moles.

A Tabela 16 apresenta um resumo das condicionantes do meio físico observadas em cada unidade.

**Tabela 16 – Resumo dos condicionantes regionais de meio físico local.**

| <b>UNIDADE</b>           | <b>COMPLEXO BELÉM DO SÃO FRANCISCO</b>                                    | <b>DEPÓSITOS ALUVIONARES</b>                    |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Litologia                | Predomínio de gnaisses ortoderivados, podendo conter porções migmatíticas | Sedimentos inconsolidados ou pouco consolidados |
| Deformações tectônicas   | Intensamente dobrada                                                      | Não há                                          |
| Fraturamento             | Pouco a moderadamente fraturada                                           | Não há                                          |
| Tipo do aquífero         | Fissural                                                                  | Granular                                        |
| Porosidade primária      | Baixa (<15%)                                                              | Alta (>30%)                                     |
| Potencial hidrogeológico | Muito baixo                                                               | Muito baixo                                     |
| Relevo                   | Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos                             | Planícies Aluvionares                           |
| Declividade              | 5° a 20°                                                                  | 0° a 3°                                         |
| Amplitude topográfica    | 30 a 80m                                                                  | Nula                                            |





|                                                                                               |  |                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                 |                                |                                                                               |                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Legenda</b><br><div><div></div> Unidade 01<br/><div></div> Principais corpos de água</div> |  | <div><div></div> Depósito aluvionares<br/><div></div> Depósitos litorâneos<br/><div></div> Depósitos flúvio-marinhos<br/><div></div> Grupo Barreiras<br/><div></div> Granitóides indiscriminados<br/><div></div> Complexo Belém do São Fransisco</div> | <b>Título</b><br><br>Figura 39 -<br>Mapa geológico<br>da região | <b>Escala</b><br><br>1:500.000 | <b>Fonte</b><br>CPRM - Mapa<br>Estadual de<br>Geodiversidade<br>de Pernambuco | <b>Datum</b><br><br>UTM WGS-84 25S |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|



## 2.4 Caracterização do empreendimento

Segundo Moraes (2022), os mapeamentos geológico-geotécnicos de campo foram realizados em diversas ocasiões durante a vida útil da unidade, sempre com a participação de engenheiros civis geotécnicos e geólogos. A área onde foi implantado o aterro sanitário tem aproximadamente 178.000m<sup>2</sup>. O relevo da região é bastante antropizado por escavações e a drenagem natural possuía caimentos para a parte central, com exceção do extremo noroeste onde há um divisor de águas bem definido.

Além da implantação das duas células, alguns outros projetos e implantações ocorreram na unidade, como terraplanagem da região entre células e deslocamento do acesso central para o perímetro, possibilitando o estágio atual de operação estudado. Atualmente a unidade atua na expansão da área de disposição, ocupando área adjacente ao maciço existente, com posterior sobreposição.



Figura 40 - Configuração da Unidade 01 que será estudada.

## 2.5 Determinação dos instrumentos analisados

A fim de realizar a atualização da estimativa de recalque para a unidade, foram identificados 30 (trinta) instrumentos (marcos superficiais), posicionados ao longo do maciço, com histórico de dados disponível, permitindo assim realizar os cálculos a partir de métodos teóricos, bem como sua aplicação para atualização e posterior comparação de resultados.

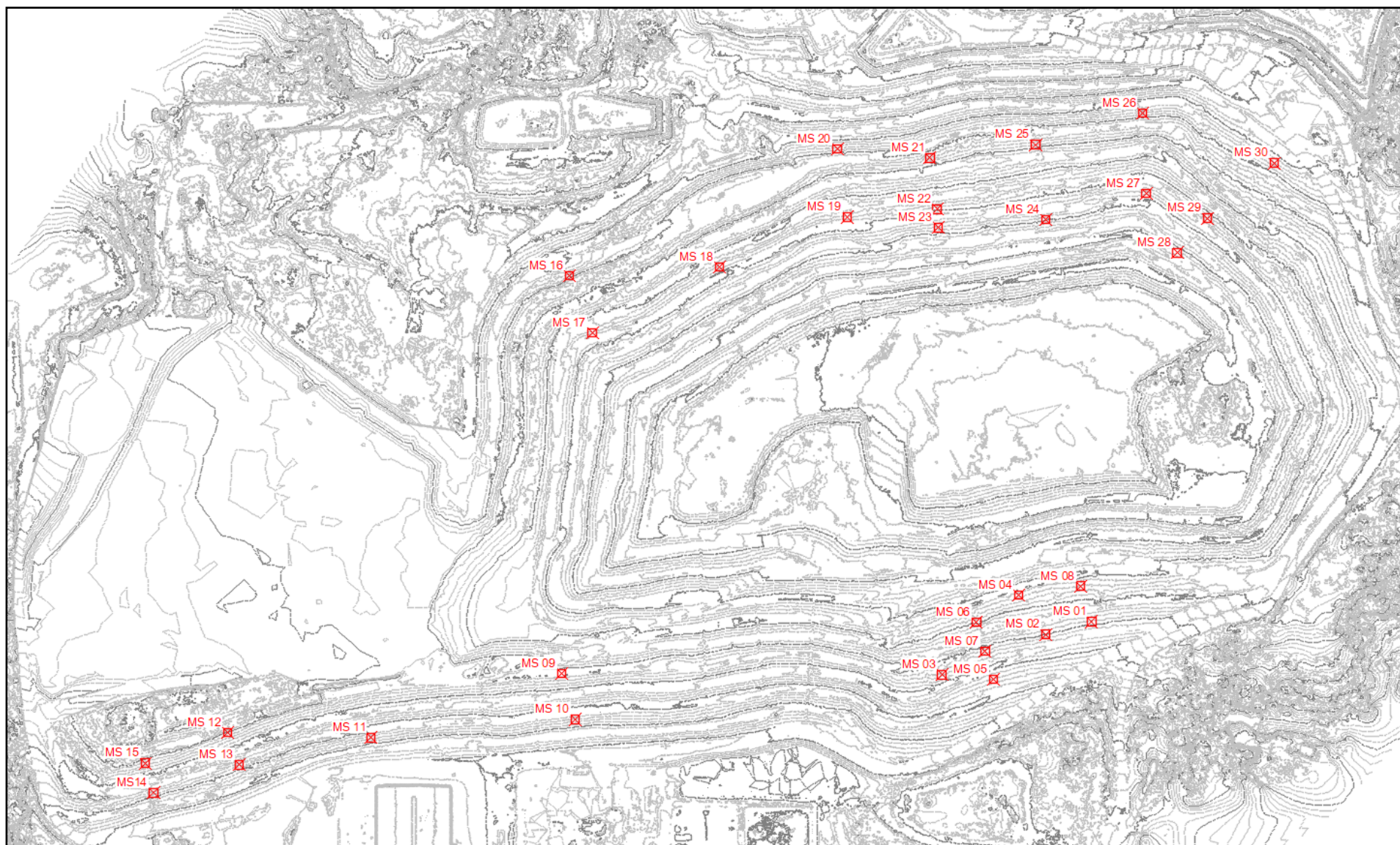
Nas tabelas a seguir são apresentadas as coordenadas iniciais dos marcos superficiais (MS) selecionados bem como a espessura da camada de resíduos sob eles. A posição desses instrumentos também pode ser observada na Figura 41.

**Tabela 17 – Localização dos Marcos Superficiais analisados.**

| LOCAL    | MS | COORDENADAS  |            | H<br>(m) | LOCAL | MS | COORDENADAS  |            | H<br>(m) |
|----------|----|--------------|------------|----------|-------|----|--------------|------------|----------|
|          |    | NORTE (m)    | ESTE (m)   |          |       |    | NORTE (m)    | ESTE (m)   |          |
| SUDESTE  | 01 | 9.096.266,37 | 282.173,82 | 6,50     | NORTE | 16 | 9.096.558,81 | 281.732,07 | 25,30    |
|          | 02 | 9.096.255,42 | 282.135,21 | 7,95     |       | 17 | 9.096.510,28 | 281.751,55 | 35,62    |
|          | 03 | 9.096.221,46 | 282.047,03 | 14,00    |       | 18 | 9.096.565,47 | 281.859,08 | 17,95    |
|          | 04 | 9.096.288,71 | 282.112,02 | 29,55    |       | 19 | 9.096.607,78 | 281.967,09 | 16,15    |
|          | 05 | 9.096.217,75 | 282.090,89 | 6,50     |       | 20 | 9.096.665,32 | 281.958,68 | 9,25     |
|          | 06 | 9.096.265,96 | 282.076,41 | 18,45    |       | 21 | 9.096.657,09 | 282.037,26 | 20,00    |
|          | 07 | 9.096.241,28 | 282.083,74 | 12,00    |       | 22 | 9.096.613,56 | 282.043,25 | 6,80     |
|          | 08 | 9.096.296,39 | 282.164,66 | 12,65    |       | 23 | 9.096.597,78 | 282.043,83 | 35,38    |
| SUDOESTE | 09 | 9.096.216,00 | 281.733,40 | 23,88    |       | 24 | 9.096.604,60 | 282.135,40 | 17,50    |
|          | 10 | 9.096.183,27 | 281.737,28 | 13,65    |       | 25 | 9.096.668,08 | 282.126,66 | 22,50    |
|          | 11 | 9.096.167,49 | 281.564,33 | 17,00    |       | 26 | 9.096.694,00 | 282.216,90 | 17,00    |
|          | 12 | 9.096.172,63 | 281.442,64 | 20,00    |       | 27 | 9.096.627,49 | 282.220,08 | 38,62    |
|          | 13 | 9.096.144,75 | 281.453,32 | 12,00    |       | 28 | 9.096.584,26 | 282.250,09 | 43,70    |
|          | 14 | 9.096.121,46 | 281.380,03 | 10,80    |       | 29 | 9.096.607,42 | 282.271,83 | 35,92    |
|          | 15 | 9.096.146,77 | 281.373,15 | 17,50    |       | 30 | 9.096.654,04 | 282.328,45 | 12,20    |

Fonte: Arquivo do autor.





**Figura 41 – Planta baixa do aterro sanitário com indicação dos Marcos Superficiais analisados.**

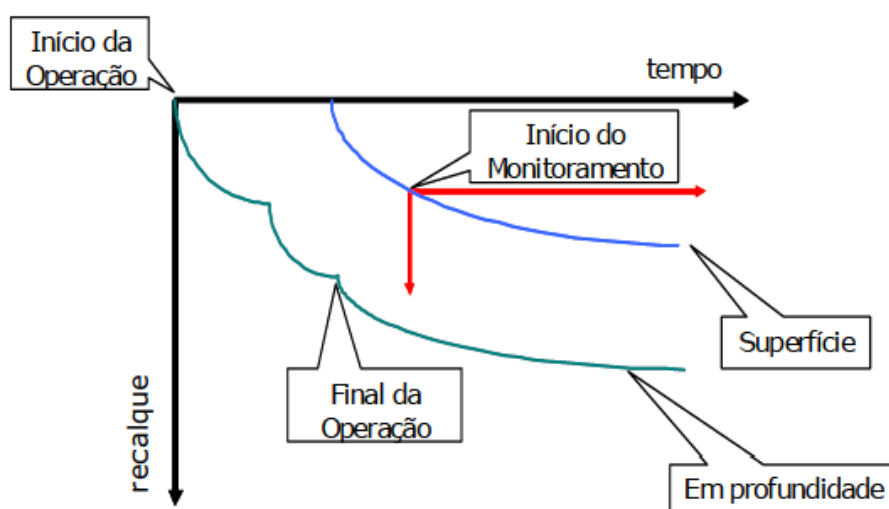
Os MS selecionados estão essencialmente sobre resíduos sólidos urbanos com períodos diferentes de operação, em camadas de resíduos depositadas há um espaço considerável de tempo (mais de um mês), período em que autores como Sowers (1973), Boscov (2008) e Tapahuasco (2009) consideram já ter ocorrido as parcelas de recalque imediato e primário em maciços de resíduos sólidos.

**Tabela 18 – Período de monitoramento dos Marcos Superficiais analisados.**

| 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.

Este procedimento de monitoramento de recalque de aterro sanitário após certo tempo de finalização da operação do alteamento está simplificado e pode ser melhor compreendido no esquema a seguir.



**Figura 42 - Esquema representativo do procedimento de monitoramento de recalque de aterro sanitário (SILVA, 2010).**



### 3 PREVISÃO DO RECALQUE A PRIORI

#### 3.1 Previsão de recalques pelo Modelo Clássico de Sowers (1973)

Este modelo corresponde ao modelo proposto na Teoria Clássica de Terzaghi para solos após adaptação por Sowers (1973), para o caso de resíduos sólidos urbanos, com a utilização de parâmetros obtidos a partir da observação e monitoramento de campo e ensaios de laboratório destes resíduos.

Dividindo o recalque dos resíduos sólidos urbanos em 3 fases (inicial, primária e secundária), tem-se para a fase inicial, analogamente ao recalque elástico de solos:

$$\frac{\Delta H_1}{H_0} = \frac{\Delta \sigma}{E} \quad \text{Equação 3.1}$$

onde:

$\Delta H_1$  = recalque correspondente à fase de compressão inicial;

$H_0$  = espessura inicial do maciço;

$\Delta \sigma$  = acréscimo de tensão vertical aplicada;

$E$  = módulo de elasticidade do maciço.

Devido à compressão inicial ser imediata e o módulo de elasticidade ser de difícil obtenção, esta parcela é comumente admitida e tratada em conjunto com a compressão primária, já que ambas se dão a partir da aplicação do carregamento.

A compressão primária de maciços sanitários por sua vez, pode ser descrita em termos do índice de compressão primária  $C_c$ , onde a diminuição do índice de vazios durante a compressão primária é resultado do acréscimo de tensão efetiva vertical, e pode ser expressa pela equação:

$$\Delta e = -C_c \cdot \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_0} \right) \quad \text{Equação 3.2}$$

onde:

$\Delta e$  = variação do índice de vazios;

$C_c$  = índice de compressão primária;

$\sigma'_0$  = tensão efetiva vertical inicial;

$\Delta \sigma$  = acréscimo da tensão vertical.

O índice de compressão  $C_c$  se relaciona com o índice de vazios inicial ( $e_0$ ), podendo variar entre  $0,15e_0$  e  $0,55e_0$ . O limite superior de  $C_c$  corresponde à maciços sanitários com maior quantidade de resíduos alimentares e materiais putrescíveis, e o limite inferior corresponde à materiais menos resilientes (SOWERS, 1973).

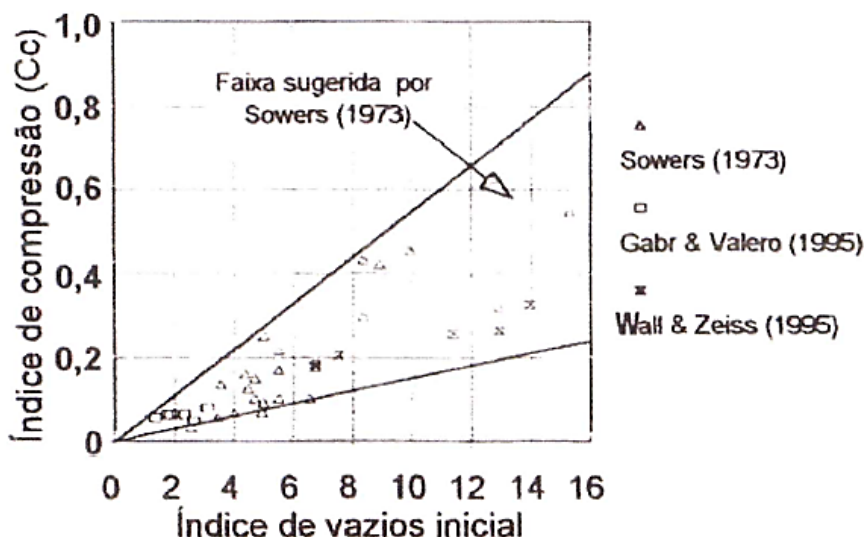


Figura 43 - Variações de índice de compressão primária - $C_c$  - em função do índice de vazios inicial-  $e_0$ - (CARVALHO, 1999).

No entanto, o índice de vazios dos maciços de resíduos sólidos é de difícil estimativa e para valores superiores a 3, típico de maciços sanitários, observa-se na Figura 43 uma faixa de variação extensa para os índices de compressão. Assim, é plausível adotar o coeficiente de compressão primária ( $C'_c$ ) conforme procedimento descrito a seguir:

Verificando-se a relação:

$$-\frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{\Delta H_1}{H_0} \quad \text{Equação 3.3}$$

Dessa forma, a equação da compressão primária passa a ser descrita da seguinte forma:

$$\frac{\Delta H_1}{H_0} = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_0} \right) \quad \text{Equação 3.4}$$

onde:

$\Delta H_1$  =recalque correspondente à fase de compressão primária.

Ao considerar o coeficiente de compressão primária ( $C'_c$ ):

$$C'_c = \frac{C_c}{1 + e_0} \quad \text{Equação 3.5}$$

Tem-se:

$$\frac{\Delta H_1}{H_0} = C'_c \cdot \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_0} \right) \quad \text{Equação 3.6}$$

Assim, serão utilizados  $C'_c$  para o coeficiente de compressão primária e  $C_c$  para o índice de compressão primária.

Na Tabela 19 são apresentados valores típicos de coeficiente de compressão primária ( $C'_c$ ) obtidos através de ensaios de laboratório ou monitoramento de campo encontrados em literatura.

**Tabela 19 – Valores típicos do coeficiente de compressão primária ( $C'_c$ ) obtidos através de ensaios de laboratório ou monitoramento de campo (COELHO, 2000).**

| REFERÊNCIA                      | FAIXA DE VARIAÇÃO DO COEF. DE COMPRESSÃO PRIMÁRIA ( $C'_c$ ) |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| SOWERS <sup>(1)</sup>           | 0,13-0,47                                                    |
| BURLINGAME <sup>(1)</sup>       | 0,05-0,25                                                    |
| GORDON <sup>(1)</sup>           | 0,05-0,10                                                    |
| RAO <i>et al</i> <sup>(1)</sup> | 0,16-0,24                                                    |
| LADVA E CLARK <sup>(1)</sup>    | 0,17-0,35                                                    |
| CHARLES <sup>(1)</sup>          | 0,10-0,19                                                    |
| CONVERSE <sup>(2)</sup>         | 0,25-0,30                                                    |
| ZOINO <sup>(2)</sup>            | 0,15-0,33                                                    |
| OWEIS E KHERA <sup>(2)</sup>    | 0,08-0,22                                                    |
| MARIANO <sup>(3)</sup>          | 0,40                                                         |
| CARVALHO E VILAR <sup>(4)</sup> | 0,18-0,21                                                    |

<sup>(1)</sup> Phillips *et al.* (1993); <sup>(2)</sup> WALL E ZEISS (1995); <sup>(3)</sup> MARIANO (1999); <sup>(4)</sup> CARVALHO E VILAR (1998); (\*) Obtido através de ensaios de lab. com amostras do Aterro de Bandeirantes

A compressão secundária dos resíduos sólidos, associada aos fenômenos de *creep* e de biodegradação, é expressa em termos de índice de compressão secundária ( $C_\alpha$ ), onde a diminuição do índice de vazios durante a compressão secundária pode ser relacionada ao tempo decorrido:

$$\Delta e = -C_\alpha \cdot \log\left(\frac{t}{t_1}\right) \quad \text{Equação 3.7}$$

onde:

$t$  = instante no qual se deseja conhecer o recalque;

$t_1$  = instante no qual termina a compressão primária.

$C_\alpha$  = índice de compressão secundária.

O índice de compressão secundária é relacionado ao potencial de biodegradação e às alterações físico-químicas, e seu valor é tão mais alto quanto maior for o teor de matéria orgânica dos resíduos e o favorecimento à degradação dos resíduos, dadas as características do ambiente do aterro (umidade, calor, presença de oxigênio, etc.).

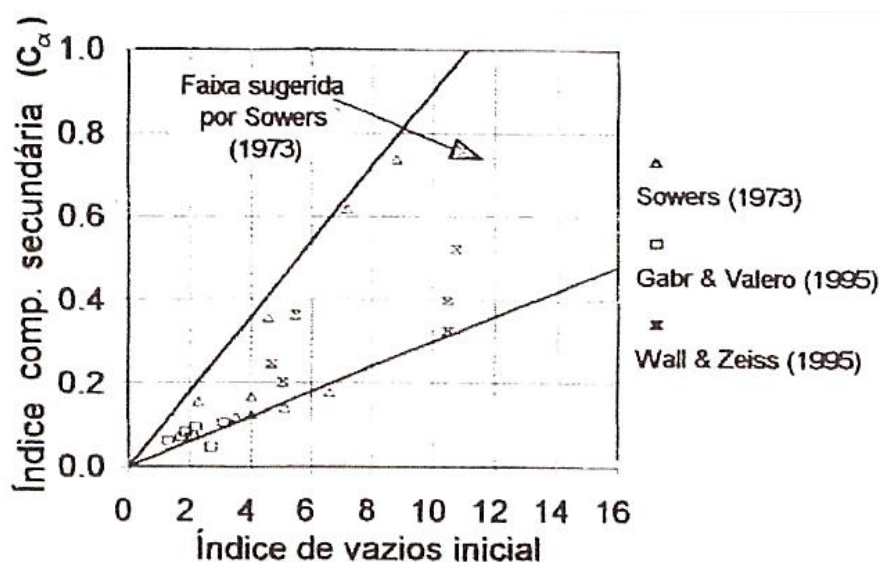


Figura 44 - Variações de índice de compressão secundária -  $C_\alpha$  - em função do índice de vazios inicial-  $e_0$ - (CARVALHO, 1999).

Analogamente à compressão primária, o recalque da compressão secundária pode ser escrito como:

$$\frac{\Delta H_2}{H_0} = C'_\alpha \cdot \log\left(\frac{t_f}{t_i}\right) \quad \text{Equação 3.8}$$

onde:

$\Delta H_2$  = recalque correspondente à fase de compressão secundária;

$C'_\alpha$  = corresponde ao coeficiente de compressão secundária.

O coeficiente de compressão secundária pode ser descrito da seguinte forma:

$$C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} \quad \text{Equação 3.9}$$

Alguns valores típicos de coeficiente de compressão secundária ( $C'_\alpha$ ) obtidos através de ensaios de laboratório ou monitoramento de campo encontrados em literatura são apresentados na Tabela 20.

**Tabela 20 – Valores típicos do coeficiente de compressão secundária ( $C'_\alpha$ ) obtidos através de ensaios de laboratório ou monitoramento de campo disponíveis em literatura (COELHO, 2000).**

| REFERÊNCIA                           | FAIXA DE VARIAÇÃO DO COEF. DE COMPRESSÃO SECUNDÁRIA ( $C'_\alpha$ ) |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| SOWERS <sup>(1)</sup>                | 0,025-0,075                                                         |
| BURLINGAME <sup>(1)</sup>            | 0,008-0,022                                                         |
| WALTER <i>et al.</i> <sup>(1)</sup>  | 0,04-0,08                                                           |
| YEN <i>et al.</i> <sup>(1)</sup>     | 0,06-0,14                                                           |
| WATTS <i>et al.</i> <sup>(1)</sup>   | 0,02-0,23                                                           |
| EDIL <i>et al.</i> <sup>(1)</sup>    | 0,012-0,075                                                         |
| GIFFORD <i>et al.</i> <sup>(1)</sup> | 0,02                                                                |
| RAO <i>et al.</i> <sup>(2)</sup>     | 0,012-0,046                                                         |
| CONVERSE <sup>(2)</sup>              | 0,07                                                                |
| ZOINO <sup>(2)</sup>                 | 0,013-0,030                                                         |
| LADVA <i>et al.</i> <sup>(2)</sup>   | 0,0005-0,029                                                        |
| KEENE <sup>(3)</sup>                 | 0,014-0,034                                                         |
| OWEIS E KHERA <sup>(3)</sup>         | 0,02-0,24                                                           |
| CARTIER E BALDIT <sup>(3)</sup>      | 0,30-0,55                                                           |
| PALMA <sup>(3)</sup>                 | 0,02-0,16                                                           |
| EL-FADEL E AL-RASHED <sup>(3)</sup>  | 0,015-0,25                                                          |
| MARIANO <sup>(3)</sup>               | 0,06-0,89                                                           |
| MARQUES <sup>(4)</sup>               | 0,04-0,018 (*)                                                      |

<sup>(1)</sup> Phillips *et al.* (1993); <sup>(2)</sup> WALL E ZEISS (1995); <sup>(3)</sup> MARIANO (1999); <sup>(4)</sup> MARQUES (2001);  
 (\*) Obtido através de ensaios de lab. com amostras do Aterro de Bandeirantes

Para fins de cálculo no desenvolvimento desse estudo, foi adotado o coeficiente de compressão secundário ( $C'_\alpha$ ) obtido em cada um dos instrumentos estudados como forma de calibração do modelo.

**Tabela 21 – Coeficientes de compressão secundária ( $C'_\alpha$ ) obtidos através do modelo de Sowers (1973).**

| MS | H <sub>0</sub><br>(m) | t <sub>1</sub><br>(dias) | t<br>(dias) | $C'_\alpha$ | $\Delta H_2$ | MS | H <sub>0</sub><br>(m) | t <sub>1</sub><br>(dias) | t<br>(dias) | $C'_\alpha$ | $\Delta H_2$ |
|----|-----------------------|--------------------------|-------------|-------------|--------------|----|-----------------------|--------------------------|-------------|-------------|--------------|
| 01 | 6,50                  | 1                        | 720         | -0,039      | -0,430       | 16 | 25,30                 | 1                        | 720         | -0,019      | -0,818       |
| 02 | 7,95                  | 1                        | 720         | -0,028      | -0,380       | 17 | 35,62                 | 1                        | 720         | -0,015      | -0,870       |
| 03 | 14,00                 | 1                        | 720         | -0,020      | -0,465       | 18 | 17,95                 | 1                        | 720         | -0,044      | -1,332       |
| 04 | 29,55                 | 1                        | 720         | -0,009      | -0,470       | 19 | 16,15                 | 1                        | 720         | -0,048      | -1,308       |
| 05 | 6,50                  | 1                        | 720         | -0,055      | -0,605       | 20 | 9,25                  | 1                        | 720         | -0,092      | -1,423       |
| 06 | 18,45                 | 1                        | 720         | -0,029      | -0,909       | 21 | 20,00                 | 1                        | 720         | -0,030      | -1,003       |
| 07 | 12,00                 | 1                        | 720         | -0,040      | -0,804       | 22 | 6,80                  | 1                        | 720         | -0,122      | -1,398       |
| 08 | 12,65                 | 1                        | 720         | -0,040      | -0,845       | 23 | 35,38                 | 1                        | 720         | -0,034      | -2,033       |
| 09 | 23,88                 | 1                        | 720         | -0,051      | -2,040       | 24 | 17,50                 | 1                        | 720         | -0,078      | -2,308       |
| 10 | 13,65                 | 1                        | 720         | -0,027      | -0,620       | 25 | 22,50                 | 1                        | 720         | -0,034      | -1,290       |
| 11 | 17,00                 | 1                        | 720         | -0,027      | -0,439       | 26 | 17,00                 | 1                        | 720         | -0,031      | -0,882       |
| 12 | 20,00                 | 1                        | 720         | -0,009      | -0,307       | 27 | 38,62                 | 1                        | 720         | -0,018      | -1,173       |
| 13 | 12,00                 | 1                        | 720         | -0,022      | -0,451       | 28 | 43,70                 | 1                        | 720         | -0,017      | -1,235       |
| 14 | 10,80                 | 1                        | 720         | -0,022      | -0,400       | 29 | 35,92                 | 1                        | 720         | -0,004      | -0,247       |
| 15 | 17,50                 | 1                        | 720         | -0,030      | -0,889       | 30 | 12,20                 | 1                        | 720         | -0,020      | -0,404       |

Fonte: Arquivo do autor.

Como pode ser observado, os coeficientes obtidos nos instrumentos analisados se apresentam coerentes com aqueles estimados por Sowers, bem como os obtidos nos estudos realizados com dados do aterro de Bandeirantes (referência nacional para estudos do tema) apresentados por Marques (2001), dessa forma, apresentam potencial calibração ao modelo, embora seja muito difícil comparar valores de  $C'_\alpha$  obtidos sem levar em consideração particularidades de cada maciço, tendo em vista ao apresentado na referência bibliográfica em que vários autores expõem

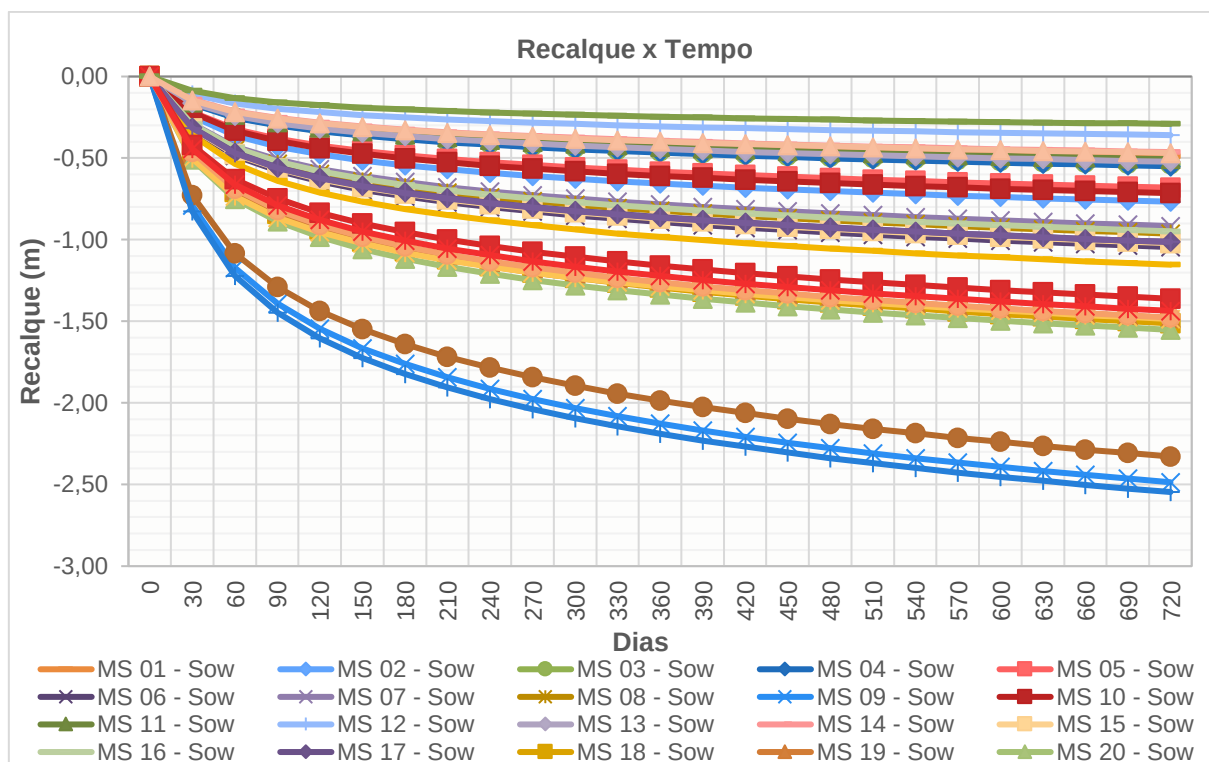
parâmetros que influenciam na compressibilidade, desde composição à condições climáticas.

A seguir são apresentados os resultados dos recalques dos Marcos Superficiais obtidos a partir do Modelo de Sowers (1973) para o período de 360 e 720 dias. Destaca-se que, em vista do período de disposição dos resíduos, os Marcos só apresentam, essencialmente, a parcela secundária do recalque.

**Tabela 22 – Recalques previstos para os marcos superficiais no período de 360 e 720 dias através do modelo de Sowers (1973).**

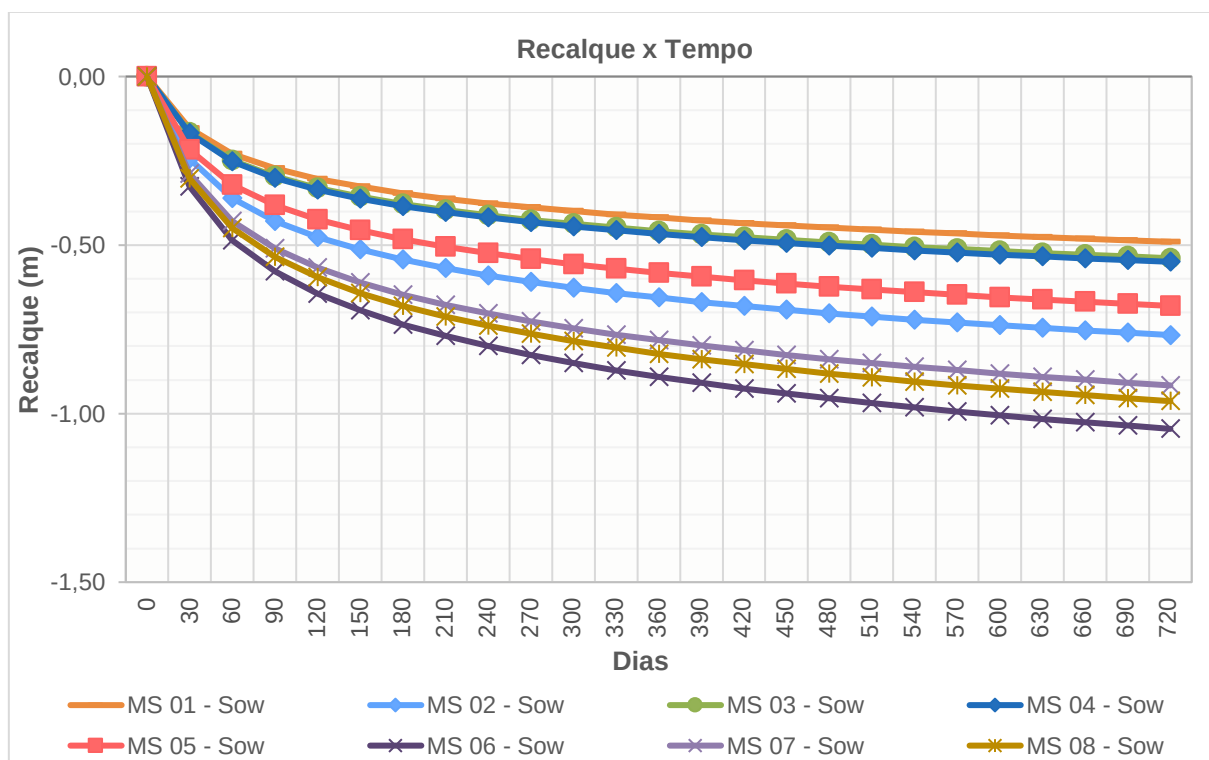
| MS | RECALQUE (m) |       |          |       | MS | RECALQUE (m) |       |          |       |
|----|--------------|-------|----------|-------|----|--------------|-------|----------|-------|
|    | 360 DIAS     | %     | 720 DIAS | %     |    | 360 DIAS     | %     | 720 DIAS | %     |
| 01 | -0,42        | 6,44  | -0,49    | 7,54  | 16 | -0,81        | 5,08  | -0,95    | 5,87  |
| 02 | -0,66        | 8,25  | -0,77    | 9,65  | 17 | -0,86        | 5,58  | -1,01    | 6,54  |
| 03 | -0,46        | 3,28  | -0,54    | 3,85  | 18 | -1,29        | 7,02  | -1,51    | 8,23  |
| 04 | -0,47        | 1,58  | -0,55    | 1,86  | 19 | -1,27        | 13,56 | -1,48    | 15,77 |
| 05 | -0,58        | 8,96  | -0,68    | 10,47 | 20 | -1,34        | 12,53 | -1,55    | 14,72 |
| 06 | -0,89        | 11,52 | -1,05    | 13,46 | 21 | -0,98        | 1,23  | -1,15    | 1,45  |
| 07 | -0,78        | 5,07  | -0,92    | 5,95  | 22 | -1,29        | 17,95 | -1,49    | 21,11 |
| 08 | -0,82        | 3,41  | -0,96    | 4,00  | 23 | -1,99        | 0,86  | -2,33    | 1,01  |
| 09 | -2,13        | 3,62  | -2,49    | 4,24  | 24 | -2,19        | 2,54  | -2,55    | 2,98  |
| 10 | -0,61        | 9,80  | -0,71    | 11,37 | 25 | -1,26        | 1,75  | -1,48    | 2,06  |
| 11 | -0,43        | 4,05  | -0,51    | 4,76  | 26 | -0,86        | 5,12  | -1,01    | 6,01  |
| 12 | -0,31        | 4,46  | -0,36    | 5,23  | 27 | -1,16        | 2,23  | -1,36    | 2,62  |
| 13 | -0,44        | 6,52  | -0,52    | 7,64  | 28 | -1,22        | 1,85  | -1,44    | 2,17  |
| 14 | -0,39        | 7,61  | -0,46    | 8,92  | 29 | -0,25        | 3,60  | -0,29    | 4,21  |
| 15 | -0,87        | 5,62  | -1,02    | 6,59  | 30 | -0,40        | 10,37 | -0,47    | 12,13 |

Fonte: Arquivo do autor.



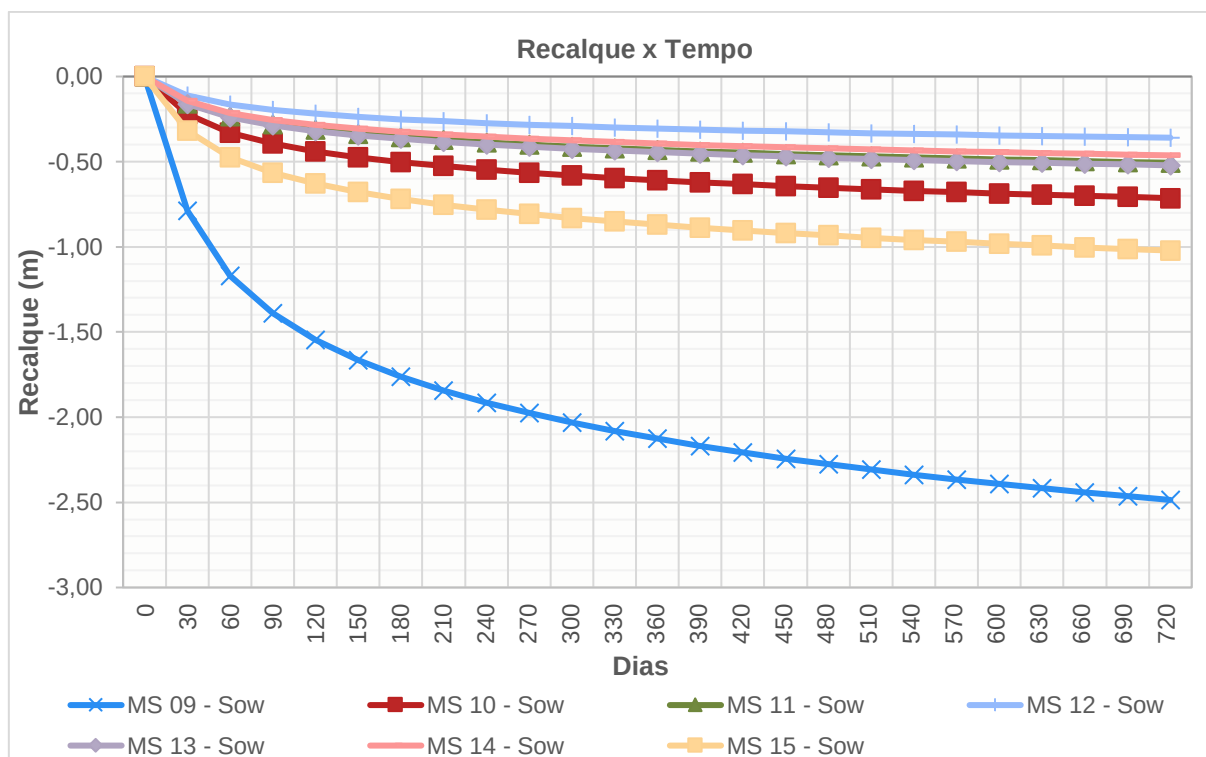
**Figura 45 – Evolução do recalque com o tempo para todos os MS analisados a partir do Modelo de Sowers (1973).**

A seguir são apresentadas as curvas de recalque com o tempo para cada um dos setores separados no estudo, possibilitando avaliação dos resultados por setor.

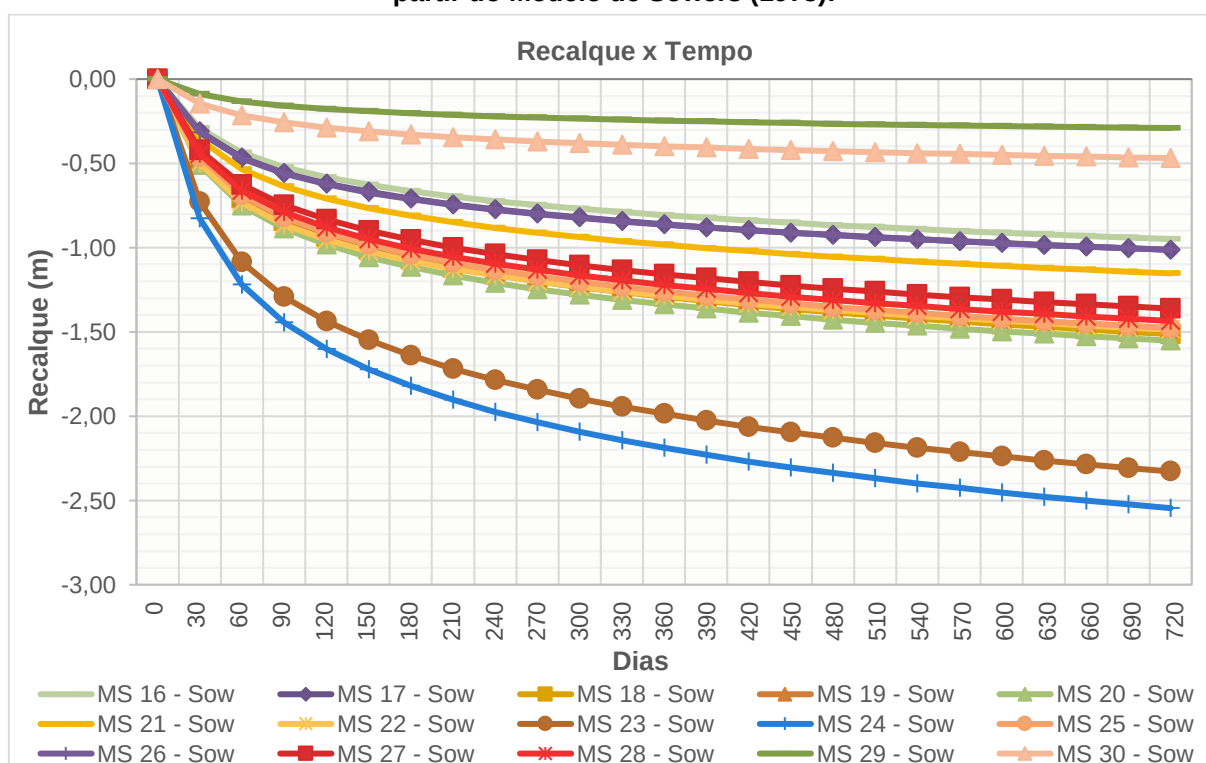


**Figura 46 – Evolução do recalque com o tempo para os MS do setor Sudeste, analisados a partir do Modelo de Sowers (1973).**





**Figura 47 – Evolução do recalque com o tempo para os MS do setor Sudoeste analisados a partir do Modelo de Sowers (1973).**



**Figura 48 – Evolução do recalque com o tempo para os MS do setor Norte analisados a partir do Modelo de Sowers (1973).**

Como pode ser observado, os cálculos pelo modelo de Sowers indicaram maiores recalques ocorrendo na face norte, com o instrumento MS 21 atingindo a

magnitude de recalque de aprox. 21% ao final dos 720 dias em relação à altura inicial, enquanto o MS 24 apresentou o maior recalque absoluto (-2,55m).

Entre os equipamentos posicionados na face sudoeste, o MS 09 se destacou por apresentar curva com maior distanciamento das demais, totalizando aproximadamente -2,49m de deslocamento vertical ao final do período, enquanto o menor deslocamento foi de -0,36 (MS 12).

A análise para a face sudeste, por sua vez, apresentou a menor dispersão de resultados, com o cálculo para 720 dias apresentando faixa de resultados entre -0,50m e -1,05m.

### 3.2 Previsão de recalques pelo Modelo de Yen e Scanlon (1975)

Conforme descrito no item 1.6.2, este modelo utiliza o conceito de idade média do aterro ( $t_1$ ) como base de definição do parâmetro de tempo. Apóia-se o modelo em uma relação linear decrescente entre as taxas de recalque e o logaritmo do tempo, aplicam-se, segundo os autores, somente aos recalques de longo prazo (secundários)

Fazendo a aplicação da Equação 1.6, Equação 1.7 e Equação 1.8, indicadas anteriormente, tem-se:

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = a - b \cdot \log \left( t - \frac{t_c}{2} \right) \quad \text{Equação 3.10}$$

onde:

$\Delta H$  = recalque;

$\Delta t$  = intervalo de tempo entre leituras;

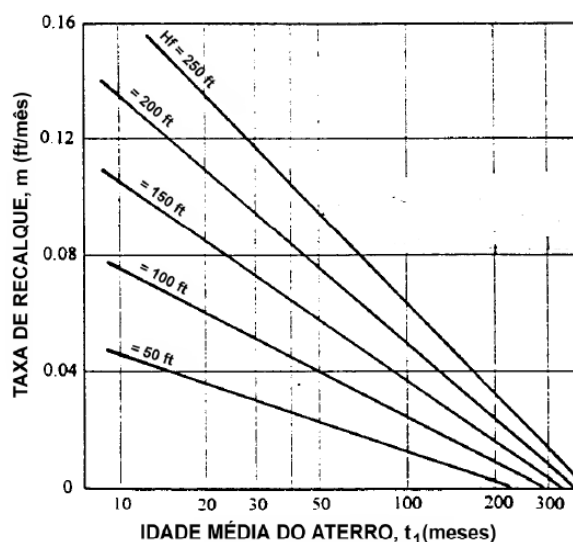
$t$  = tempo do início da construção;

$t_c$  = tempo de construção do aterro;

$a$  = parâmetro que varia com altura do aterro e o tempo de construção do maciço (mês), definido por  $0,00095 H_f + 0,0985$ , em que  $H_f$  corresponde à espessura do maciço de resíduos em metros;

$b$  = parâmetros que também varia com altura do aterro e o tempo de construção do maciço (mês), definido por  $0,00035 H_f + 0,00509$ , sendo  $H_f$  a espessura do maciço de resíduos em metros.

Sohn e Lee (1994, *apud.* MARQUES, 2001) apresentaram um ábaco que permite a interpolação de idade média do aterro, a taxa de recalque e a espessura do maciço de resíduos. Esta se torna uma alternativa a ser utilizada, no entanto, exige cautela e prudência para adequado entendimento e aplicação.



**Figura 49 - Variação da taxa de recalque com a altura e a idade média do aterro (SOHN E LEE, 1994, *apud.* MARQUES, 2001)**

A aplicação deste modelo no geral, no entanto, à aterros como AS1 Bandeirantes (CARVALHO, 1999), aterro experimental (MARQUES, 2001), CTR Recreio (DENARDIN, 2013), CTR São Leopoldo (TEIXEIRA, 2015) e CTR Nova Iguaçu (KLINK, 2019) conduziu a valores e tendências não consistentes para os pontos testados, apontados por coeficientes de determinação ( $R^2$ )<sup>5</sup> reduzidos, e portanto, pouco satisfatórios.

**Tabela 23 – Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) médios obtidos por alguns autores para o Modelo de Yen & Scanlon (1975).**

| REFERÊNCIA      | COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO - $R^2$ |
|-----------------|-------------------------------------|
| CARVALHO (1999) | 0,45                                |
| MARQUES (2001)  | 0,50                                |
| DENARDIN (2013) | 0,71                                |
| TEIXEIRA (2015) | 0,83                                |

<sup>5</sup> Conceito matemático-estatístico, que informa o percentual que é eliminado do erro de previsão na variável “y” quando usa-se a regressão de mínimos quadrados sobre a variável “x”.

Os autores supracitados atribuem tais resultados às características de desenvolvimento do método, de forma empírica, a partir do monitoramento de três aterros sanitários em região dos EUA com clima seco, com alturas entre de 6,0m a 38,0m, por um período de 9 anos.

Além disso, em vista das parcelas envolvidas na formulação, torna-se de fundamental importância, ao mesmo passo que é elevada a dificuldade, a definição do parâmetro  $t_0$  (tempo zero), bem como das constantes de cada cenário (a e b).

Dessa forma, analisando a aplicação dos estudos apresentados anteriormente e ponderações observadas, Ling *et al.* (1998) propuseram a utilização de uma função logarítmica simplificada para reprodução das curvas de recalque a partir da equação básica proposta por Yen e Scanlon (1975) vista acima, admitindo como tempo inicial ( $t_0$ ) o tempo correspondente ao início das medidas de recalque, e dessa forma, foi utilizado no desenvolvimento desse trabalho, apresentando o recalque da seguinte forma:

$$\Delta H = a' - b' \cdot \log t \quad \text{Equação 3.11}$$

Simões (2000) defende que esse modelo empírico deve ser ajustado a partir de dados de campo de cada aterro e para este estudo, o ajuste foi feito adotando parâmetros denominados  $a'$  e  $b'$  referentes a cada instrumento monitorado na unidade estudada, bem como, a exemplo da aplicação no Modelo de Sowers (1973), o início do monitoramento foi adotado como momento  $t_0$ . A altura da coluna dos resíduos foi obtida a partir das cotas do fundo do aterro e das cotas nos marcos no início dos monitoramentos. Esta simplificação apresentou melhor aderência nos estudos referenciados acima, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) se aproximando de 1 (100%).

**Tabela 24 – Parâmetros obtidos do Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975).**

| MS | $a'$  | $b'$  | $R^2$ | MS | $a'$  | $b'$  | $R^2$ |
|----|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------|
| 01 | 0,101 | 0,139 | 0,847 | 16 | 0,235 | 0,305 | 0,880 |
| 02 | 0,132 | 0,158 | 0,787 | 17 | 0,162 | 0,306 | 0,894 |
| 03 | 0,165 | 0,195 | 0,804 | 18 | 0,292 | 0,433 | 0,880 |
| 04 | 0,127 | 0,206 | 0,939 | 19 | 0,288 | 0,442 | 0,901 |

| MS | a'    | b'    | R <sup>2</sup> | MS | a'    | b'    | R <sup>2</sup> |
|----|-------|-------|----------------|----|-------|-------|----------------|
| 05 | 0,195 | 0,248 | 0,813          | 20 | 0,411 | 0,484 | 0,856          |
| 06 | 0,206 | 0,335 | 0,874          | 21 | 0,114 | 0,345 | 0,974          |
| 07 | 0,225 | 0,305 | 0,886          | 22 | 0,117 | 0,488 | 0,983          |
| 08 | 0,142 | 0,365 | 0,931          | 23 | 0,185 | 0,732 | 0,980          |
| 09 | 0,460 | 0,775 | 0,937          | 24 | 0,120 | 0,850 | 0,984          |
| 10 | 0,099 | 0,254 | 0,964          | 25 | 0,153 | 0,431 | 0,980          |
| 11 | 0,109 | 0,169 | 0,891          | 26 | 0,257 | 0,316 | 0,888          |
| 12 | 0,075 | 0,120 | 0,873          | 27 | 0,105 | 0,415 | 0,980          |
| 13 | 0,091 | 0,161 | 0,956          | 28 | 0,172 | 0,488 | 0,965          |
| 14 | 0,095 | 0,176 | 0,883          | 29 | 0,116 | 0,285 | 0,841          |
| 15 | 0,150 | 0,365 | 0,963          | 30 | 0,052 | 0,179 | 0,966          |

Fonte: Arquivo do autor.

Os parâmetros obtidos nos instrumentos analisados se apresentam coerentes com aqueles estimados por bibliografias especializadas e estudos realizados e citados anteriormente, dessa forma, apresentam potencial calibração ao modelo, embora reafirma-se que seja muito difícil comparar valores obtidos sem levar em consideração particularidades de cada maciço, tendo em vista ao apresentado na referência bibliográfica em que vários autores expõem parâmetros que influenciam na compressibilidade, desde composição à condições climáticas.

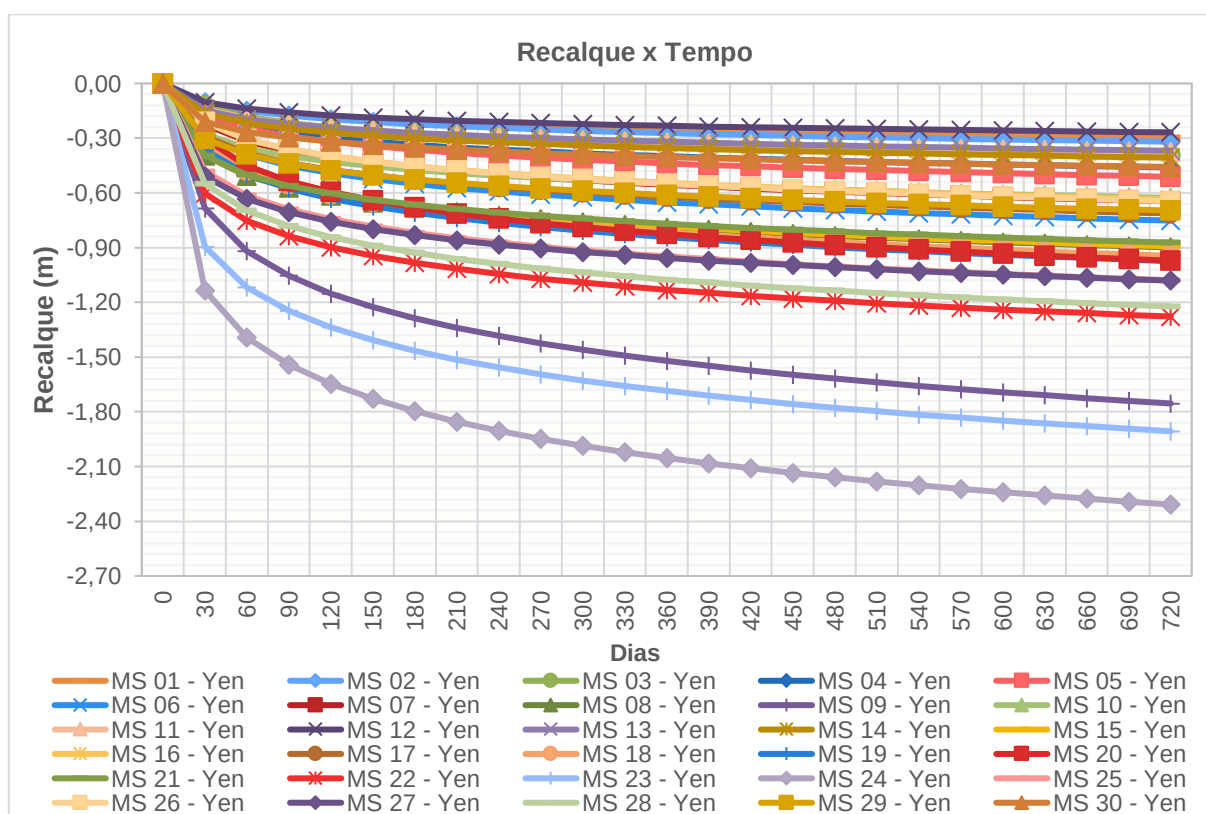
A seguir são apresentados os resultados dos recalques dos Marcos Superficiais obtidos a partir do Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975) para o período de 360 e 720 dias. Destaca-se que, em vista do período de disposição dos resíduos, os Marcos só apresentam, essencialmente, a parcela secundária do recalque.

**Tabela 25 – Recalques previstos para os marcos superficiais no período de 360 e 720 dias através do Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975).**

| MS | RECALQUE (m) |      |          |      | MS | RECALQUE (m) |      |          |      |
|----|--------------|------|----------|------|----|--------------|------|----------|------|
|    | 360 DIAS     | %    | 720 DIAS | %    |    | 360 DIAS     | %    | 720 DIAS | %    |
| 01 | -0,25        | 3,92 | -0,30    | 4,56 | 16 | -0,54        | 2,15 | -0,64    | 2,51 |
| 02 | -0,27        | 3,42 | -0,32    | 4,02 | 17 | -0,62        | 1,55 | -0,71    | 2,00 |

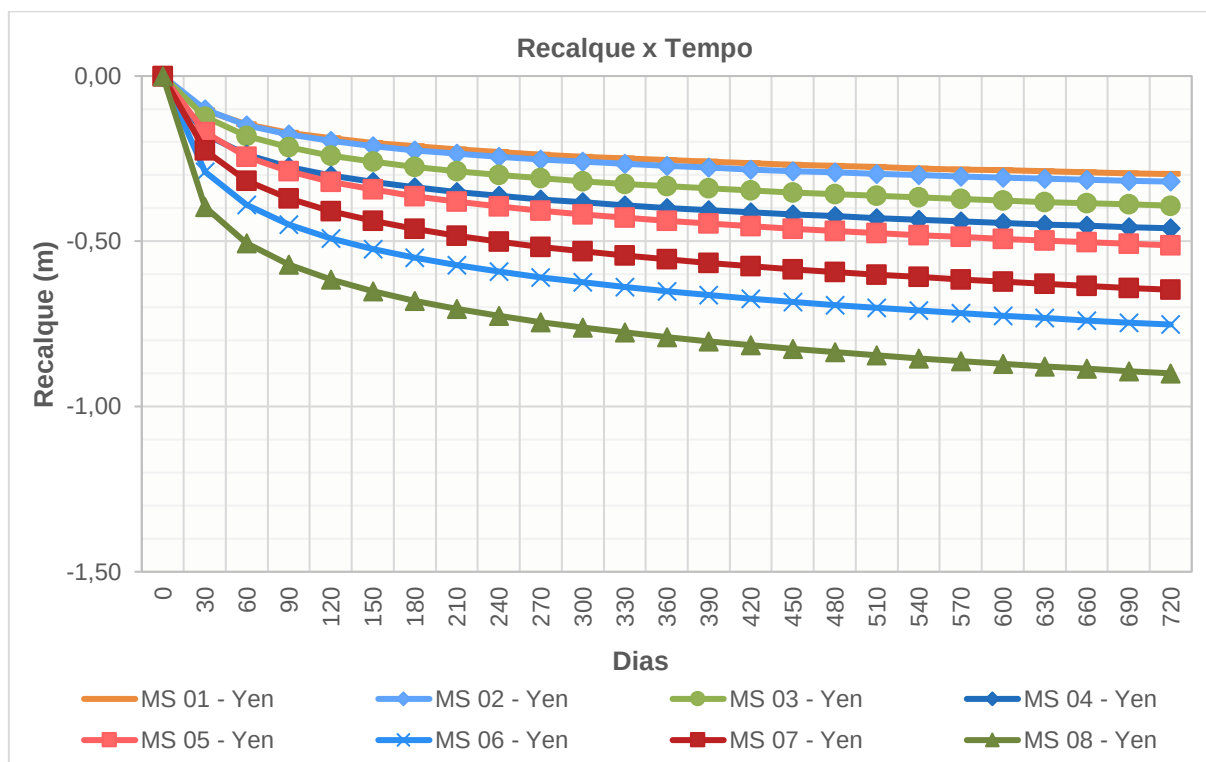
| MS | RECALQUE (m) |      |          |      | MS | RECALQUE (m) |       |          |       |
|----|--------------|------|----------|------|----|--------------|-------|----------|-------|
|    | 360 DIAS     | %    | 720 DIAS | %    |    | 360 DIAS     | %     | 720 DIAS | %     |
| 03 | -0,33        | 2,38 | -0,39    | 2,80 | 18 | -0,82        | 2,15  | -0,95    | 5,27  |
| 04 | -0,40        | 1,35 | -0,46    | 1,56 | 19 | -0,84        | 1,74  | -0,97    | 6,04  |
| 05 | -0,44        | 6,73 | -0,51    | 7,88 | 20 | -0,83        | 4,54  | -0,97    | 10,50 |
| 06 | -0,65        | 3,53 | -0,75    | 4,07 | 21 | -0,77        | 5,21  | -0,87    | 4,36  |
| 07 | -0,55        | 4,62 | -0,65    | 5,39 | 22 | -1,13        | 8,93  | -1,28    | 18,79 |
| 08 | -0,79        | 6,25 | -0,90    | 7,11 | 23 | -1,69        | 3,84  | -1,91    | 5,39  |
| 09 | -1,52        | 6,37 | -1,75    | 7,35 | 24 | -2,05        | 16,63 | -2,31    | 13,19 |
| 10 | -0,55        | 4,04 | -0,63    | 4,60 | 25 | -0,95        | 4,77  | -1,08    | 4,79  |
| 11 | -0,32        | 3,28 | -0,37    | 3,80 | 26 | -0,55        | 11,73 | -0,65    | 3,80  |
| 12 | -0,23        | 1,16 | -0,27    | 1,34 | 27 | -0,96        | 4,22  | -1,08    | 2,80  |
| 13 | -0,32        | 2,67 | -0,37    | 3,07 | 28 | -1,08        | 3,24  | -1,22    | 2,80  |
| 14 | -0,35        | 3,27 | -0,41    | 3,76 | 29 | -0,61        | 2,48  | -0,70    | 1,94  |
| 15 | -0,78        | 4,48 | -0,89    | 5,10 | 30 | -0,40        | 2,46  | -0,46    | 3,75  |

Fonte: Arquivo do autor.

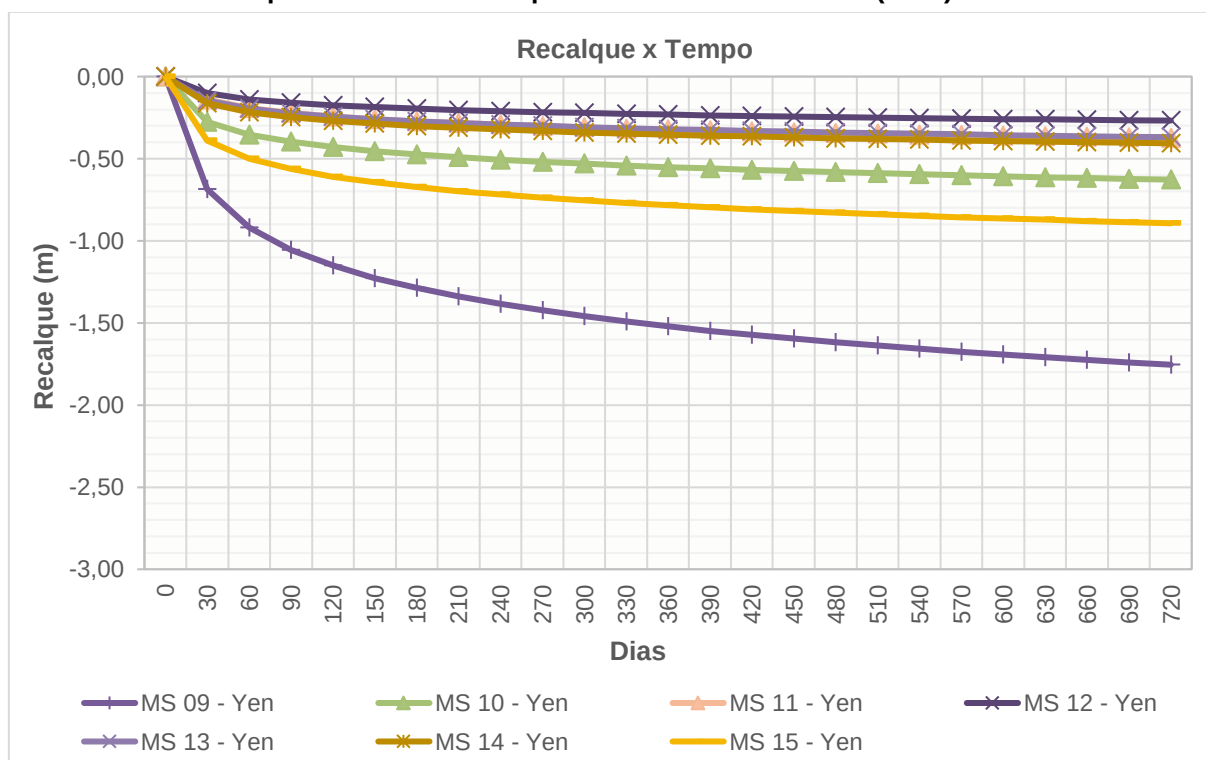


**Figura 50 – Evolução do recalque com o tempo para todos os MS analisados a partir do Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975).**

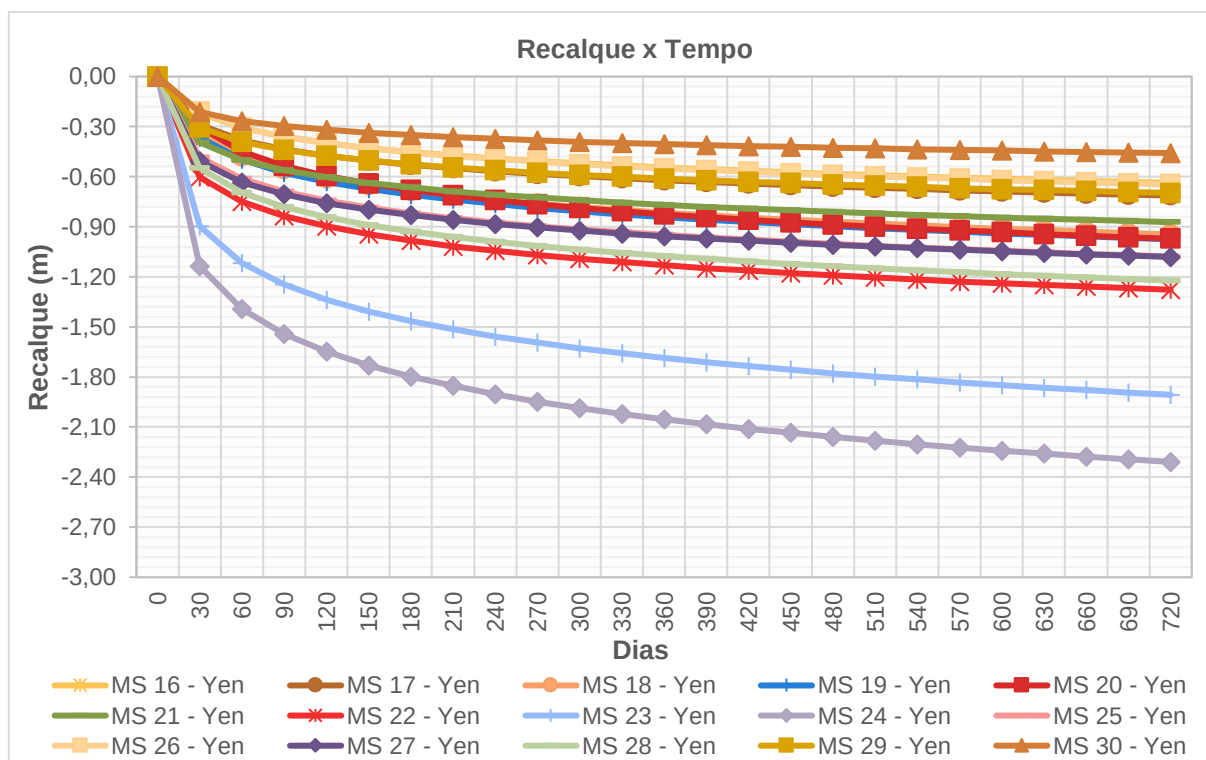
A seguir são apresentadas as curvas de recalque com o tempo para cada uma dos setores separados no estudo, possibilitando avaliação dos resultados por setor.



**Figura 51 – Evolução do recalque com o tempo para os MS do setor Sudeste, analisados a partir do modelo simplificado de Yen e Scanlon (1975).**



**Figura 52 – Evolução do recalque com o tempo para os MS do setor Sudoeste analisados a partir do modelo simplificado de Yen e Scanlon (1975).**



**Figura 53 – Evolução do recalque com o tempo para os MS do setor Norte analisados a partir do Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975).**

Como pode ser observado, os cálculos pelo modelo simplificado de Yen e Scanlon indicaram maiores recalques ocorrendo na face norte, com o instrumento MS 22 atingindo a magnitude de recalque de aprox. 19% ao final dos 720 dias em relação à altura inicial, enquanto o MS 24 apresentou o maior recalque absoluto (-2,31m).

Entre os equipamentos posicionados na face sudoeste, o MS 09 se destacou por apresentar curva com maior distanciamento das demais, totalizando aproximadamente -1,75m de deslocamento vertical ao final do período, enquanto o menor deslocamento foi de -0,27m (MS 12).

A análise para a face sudeste, por sua vez, apresentou a menor dispersão de resultados, com o cálculo para 720 dias apresentando faixa de resultados entre -0,30m (MS 02) e -0,90m (MS 08).



## 4 RECALQUES AFERIDOS – FUNÇÃO DE VEROSSIMILHANÇA

### 4.1 Aferição dos marcos superficiais do estudo de caso

Os dados históricos de monitoramento de recalque disponibilizados para o presente estudo englobam, conforme já destacado anteriormente, 30 (trinta) marcos superficiais implantados na superfície de um maciço de resíduos sólidos urbanos na Região Metropolitana de Recife, Pernambuco - PE.

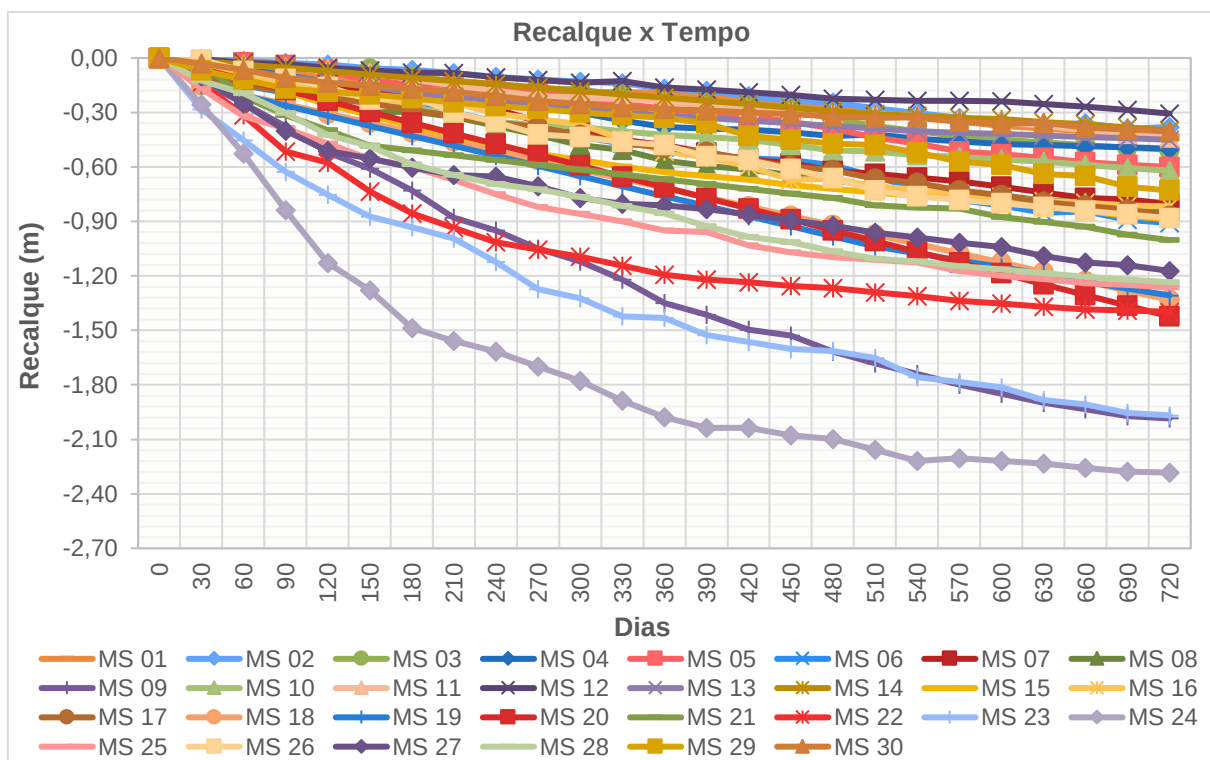
Os dados dos trinta instrumentos, obtidos a partir das aferições mensais disponibilizadas pela empresa responsável pela unidade, serão utilizados como base para a determinação da função de verossimilhança.

Os dados dos 30 (trinta) marcos selecionados são apresentados de forma resumida na Tabela 25 e na Figura 54, onde são apresentadas as evoluções dos recalques aferidos ao longo do tempo.

**Tabela 26 – Recalques aferidos em monitoramento no período de 360 e 720 dias.**

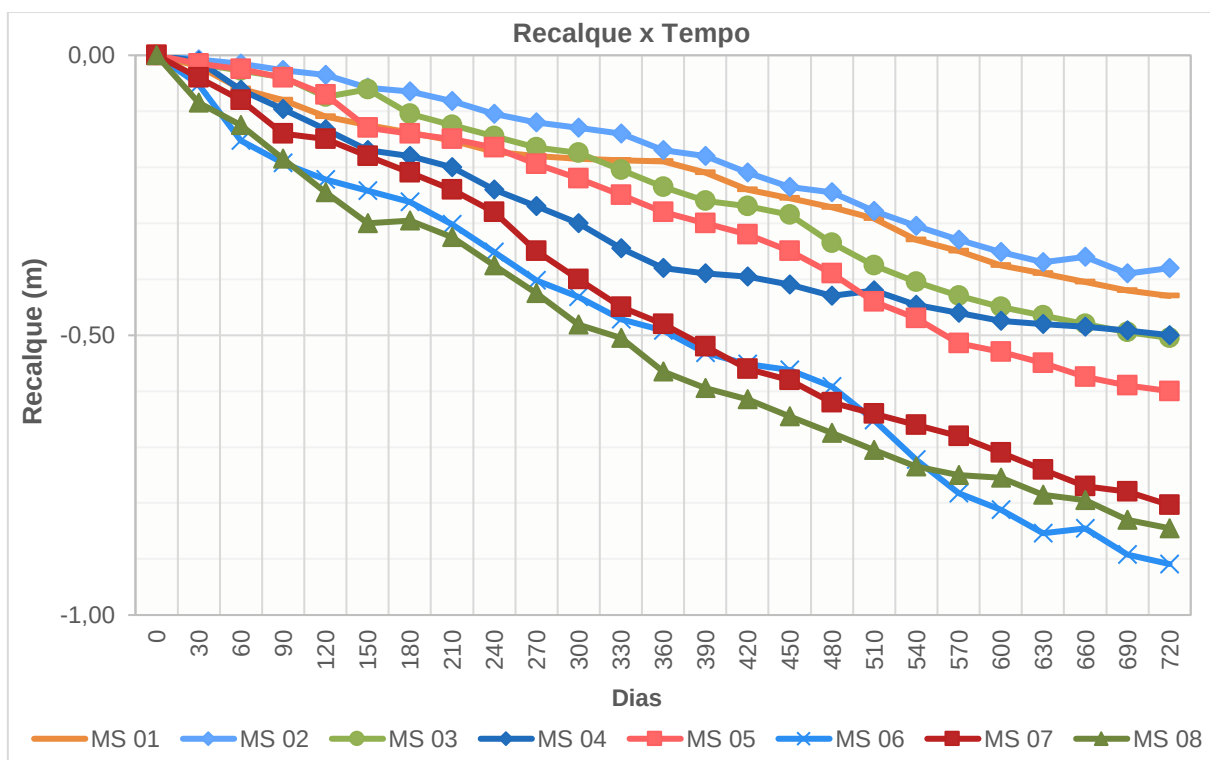
| MS | RECALQUE (m) |      |          |      | MS | RECALQUE (m) |       |          |       |
|----|--------------|------|----------|------|----|--------------|-------|----------|-------|
|    | 360 DIAS     | %    | 720 DIAS | %    |    | 360 DIAS     | %     | 720 DIAS | %     |
| 01 | -0,190       | 2,92 | -0,430   | 6,62 | 16 | -0,516       | 2,04  | -0,818   | 3,23  |
| 02 | -0,170       | 2,14 | -0,380   | 4,78 | 17 | -0,493       | 1,39  | -0,870   | 2,44  |
| 03 | -0,235       | 1,68 | -0,505   | 3,61 | 18 | -0,716       | 3,99  | -1,332   | 7,42  |
| 04 | -0,380       | 1,29 | -0,500   | 1,69 | 19 | -0,761       | 4,71  | -1,308   | 8,10  |
| 05 | -0,280       | 4,31 | -0,600   | 9,23 | 20 | -0,712       | 7,69  | -1,423   | 15,38 |
| 06 | -0,492       | 2,66 | -0,909   | 4,92 | 21 | -0,667       | 3,34  | -1,003   | 5,02  |
| 07 | -0,480       | 4,00 | -0,804   | 6,70 | 22 | -1,195       | 17,57 | -1,398   | 20,56 |
| 08 | -0,565       | 4,47 | -0,845   | 6,68 | 23 | -1,433       | 4,05  | -1,968   | 5,56  |
| 09 | -1,350       | 5,65 | -1,985   | 8,31 | 24 | -1,978       | 11,30 | -2,283   | 13,05 |
| 10 | -0,425       | 3,11 | -0,621   | 4,55 | 25 | -0,950       | 4,22  | -1,265   | 5,62  |
| 11 | -0,239       | 2,43 | -0,439   | 4,47 | 26 | -0,481       | 2,83  | -0,882   | 5,19  |
| 12 | -0,162       | 0,81 | -0,307   | 1,53 | 27 | -0,812       | 2,10  | -1,173   | 3,04  |
| 13 | -0,315       | 2,63 | -0,451   | 3,76 | 28 | -0,855       | 1,96  | -1,235   | 2,83  |
| 14 | -0,219       | 2,02 | -0,400   | 3,70 | 29 | -0,330       | 0,92  | -0,730   | 2,03  |
| 15 | -0,631       | 3,61 | -0,889   | 5,08 | 30 | -0,280       | 2,30  | -0,404   | 3,31  |

Fonte: Arquivo do autor.

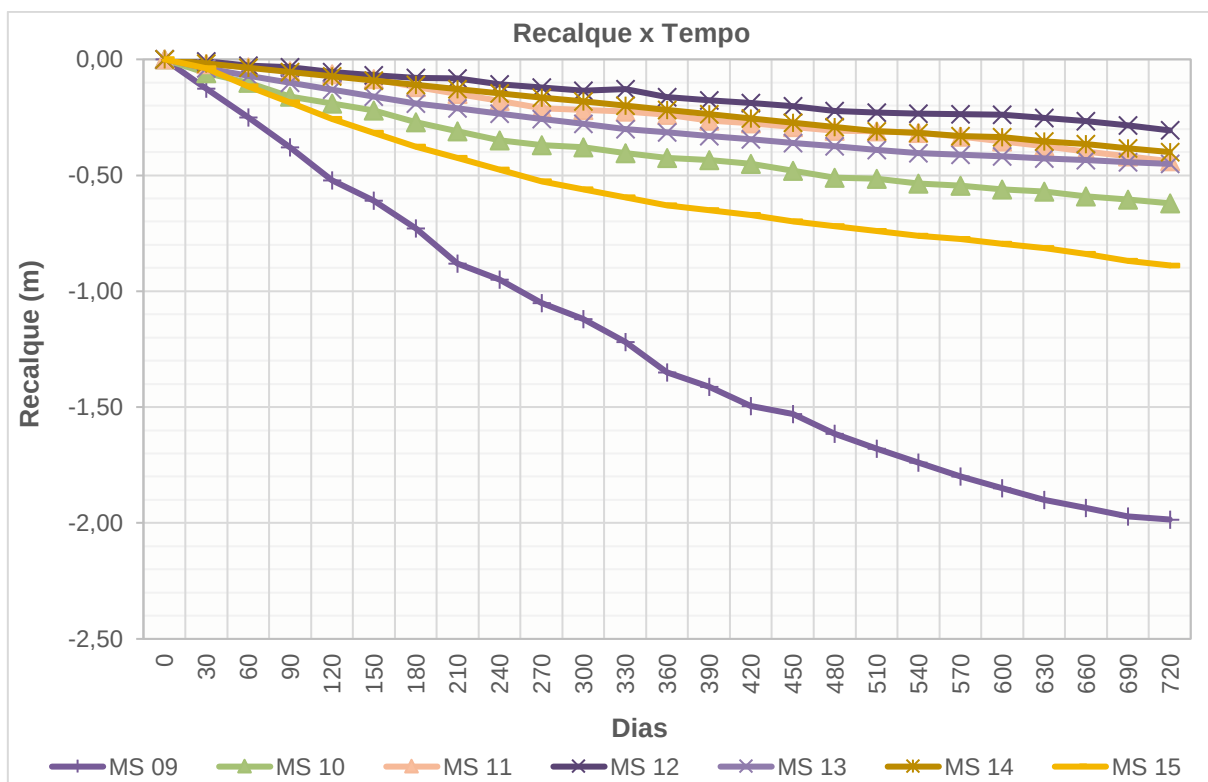


**Figura 54 – Evolução do recalque com o tempo aferido em todos os MS em monitoramentos mensais.**

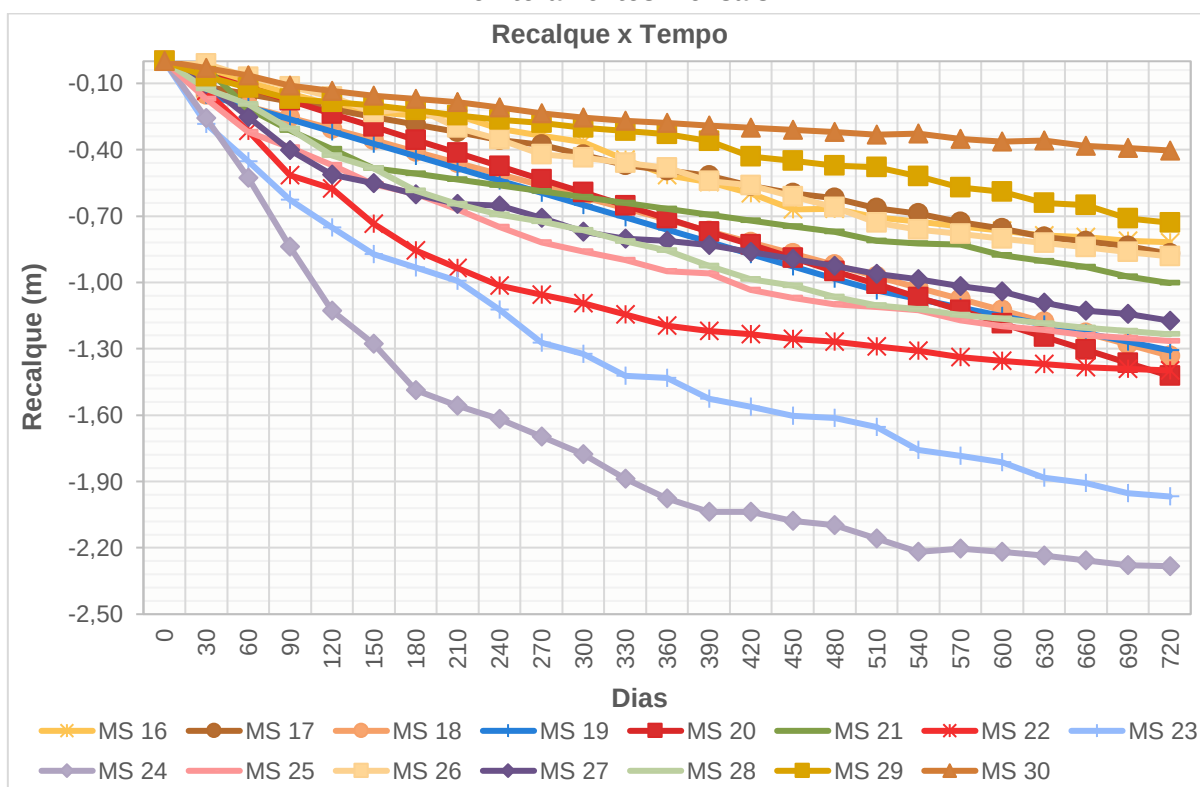
A seguir são apresentadas as curvas de recalque com o tempo para cada uma dos setores separados no estudo, possibilitando avaliação dos resultados específicos.



**Figura 55 – Evolução do recalque com o tempo aferido nos MS do setor Sudeste em monitoramentos mensais.**



**Figura 56 – Evolução do recalque com o tempo aferido nos MS do setor Sudoeste em monitoramentos mensais.**



**Figura 57 – Evolução do recalque com o tempo aferido nos MS do setor Norte em monitoramentos mensais.**

Ao observar os dados aferidos, é possível constatar maiores recalques ocorrendo na face norte, com o instrumento MS 22 atingindo a magnitude de recalque

de aprox. 20% ao final dos 720 dias em relação à altura inicial, enquanto o MS 24 apresentou o maior recalque absoluto (-2,28m).

Entre os equipamentos posicionados na face sudoeste, o MS 09 se destacou por apresentar curva com maior distanciamento das demais, totalizando aproximadamente -1,99m de deslocamento vertical ao final do período, enquanto o menor deslocamento foi de -0,31 (MS 12).

A análise para a face sudeste, por sua vez, apresentou a menor dispersão de resultados e curvas mais suaves, com o monitoramento para 720 dias apresentando faixa de recalques entre -0,38m (MS 02) e -0,91m (MS 06).

Também é possível observar que a maior diferença de proporção de recalque (%) entre os dois momentos de monitoramento destacados, 360 e 720 dias, foi observada no MS 20 (7,69%), seguido do MS 05 (4,92%), posicionados nos setores norte e sudeste, respectivamente. Enquanto a menor diferença, 0,41%, foi observada no instrumento MS 04, localizado no setor sudeste.

## 5 ATUALIZAÇÃO DO RECALQUE - A POSTERIORI

As equações para aplicação das distribuições conjugadas exibidas no item 1.8, formuladas a partir da aplicação do Teorema de Bayes e com base na distribuição normal, possibilitam que se combinem os valores estimados de recalque obtidos por intermédio de métodos teóricos (item 1.6), assumidos como a distribuição *a priori*, enquanto os dados de monitoramento mensal dos marcos superficiais da unidade, indicados no item 4, são considerados como a distribuição da função de verossimilhança.

Conforme indicado nos capítulos anteriores, as atualizações dos recalques seguem, inicialmente, o mesmo padrão apresentado para as estimativas *a priori* e de “*verossimilhança*”, considerando-se as análises englobando todos os setores compilados, com posterior verificação da atualização do recalque para cada setor da unidade. Como os marcos superficiais monitorados exibem comportamentos distintos subdivididos pelas faces do maciço, resultado da sequência histórica de disposição e ações ocorridas, optou-se por realizar essas atualizações também separadamente.

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

A Tabela 27 resume os parâmetros obtidos para a aplicação do Teorema de Bayes englobando todos os setores, considerando a distribuição *a priori* como a estimativa de recalque calculada pelo Modelo de Sowers (1973) e a função de verossimilhança assumida pelos dados obtidos nos MS em monitoramento mensal.

**Tabela 27 – Parâmetros da distribuição *a posteriori* do recalque para todos os setores a partir do Modelo de Sowers (1973).**

| PERÍODO DE ANÁLISE (DIAS) | PARCELA                | MÉDIA $\mu(m)$ | DESVIO PADRÃO $\sigma(m)$ | VARIÂNCIA $\sigma^2(m^2)$ | A POSTERIORI |             |                 |
|---------------------------|------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|--------------|-------------|-----------------|
|                           |                        |                |                           |                           | $\mu(m)$     | $\sigma(m)$ | $\sigma^2(m^2)$ |
| 360                       | <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                      |              |             |                 |
| 720                       | <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                      |              |             |                 |

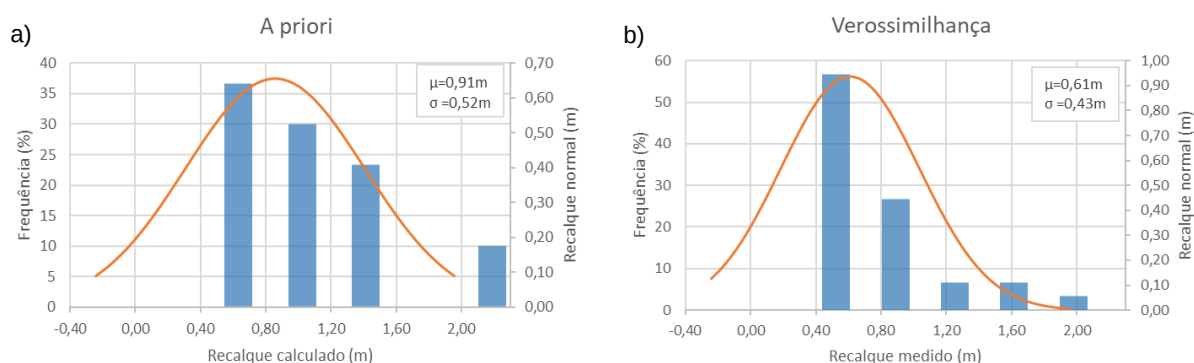
Fonte: Arquivo do autor.

Ao observar os parâmetros obtidos, pode-se perceber em ambos cenários avaliados aqueles resultado dos cálculos pelo Modelo de Sowers se apresentando superiores aos medidos, no entanto, enquanto a média para 720 dias indica valor aproximadamente 14% acima da média para os dados medidos, a média para 360 dias indica valores da ordem de 49% acima daquelas aferidos em campo.

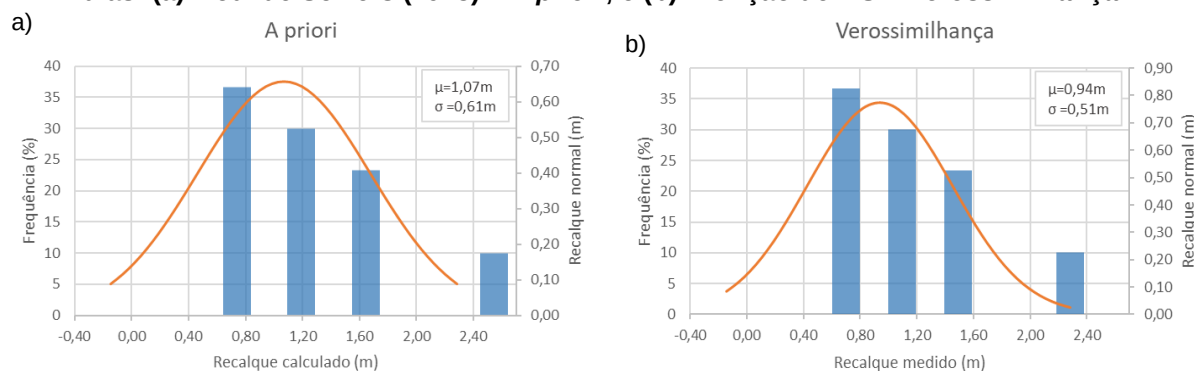
A partir desses parâmetros, foi possível gerar a curva normalizada tanto para os dados de verossimilhança, quanto para os resultados *a priori*.

Apresenta-se na Figura 58 a distribuição normal gerada a partir do Modelo do Sowers (1973) assumido como função *a priori* e da função de verossimilhança obtida a partir das aferições dos marcos superficiais no monitoramento mensal para o período de 360 dias. Enquanto a Figura 59 apresenta os resultados para o período de 720 dias.

Adicionalmente, estão apresentados os histogramas para cada um desses parâmetros analisados.



**Figura 58 - Histograma relacionado com a distribuição normal do recalque no período de 360 dias: (a) Mod. de Sowers (1973) – *A priori*; e (b) Aferição de MS – *Verossimilhança*.**



**Figura 59 - Histograma relacionado com a distribuição normal do recalque no período de 720 dias: (a) Mod. de Sowers (1973) – *A priori*; e (b) Aferição de MS – *Verossimilhança*.**

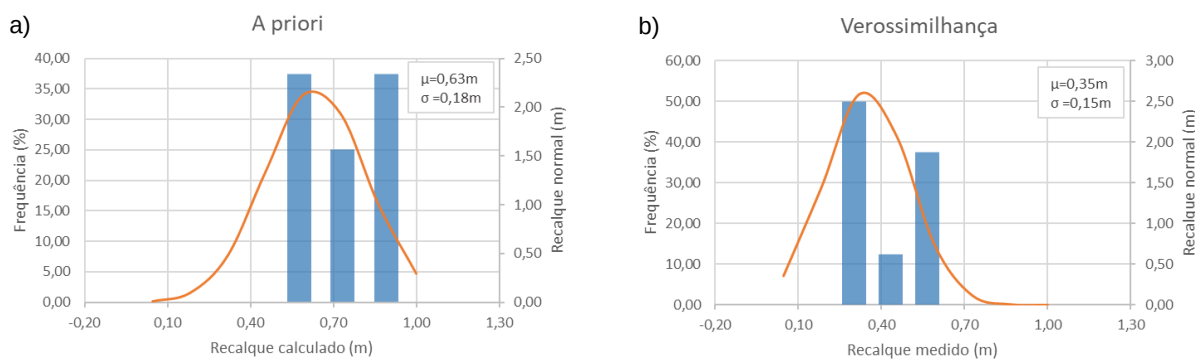
Também foram realizadas as análises desses parâmetros para os três setores identificados separadamente. A Tabela 28 resume os parâmetros obtidos para a

aplicação do Teorema de Bayes para cada setor, considerando a distribuição *a priori* como a estimativa de recalque calculada pelo Modelo de Sowers (1973) e a função de verossimilhança assumida pelos dados aferidos nos MS em monitoramento mensal.

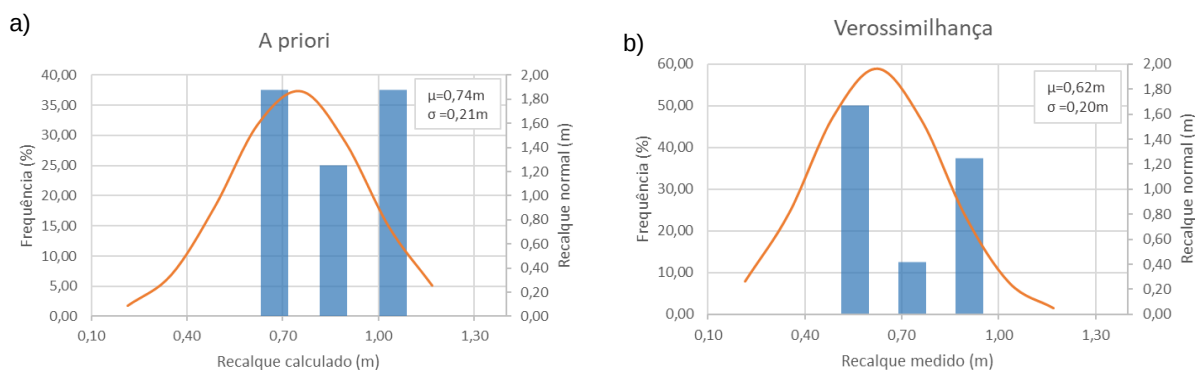
**Tabela 28 – Parâmetros da distribuição *a posteriori* do recalque para cada setor a partir do Modelo de Sowers (1973).**

| PERÍODO DE ANÁLISE (DIAS) | SETOR | PARCELA                | MÉDIA $\mu(m)$ | DESVIO PADRÃO $\sigma(m)$ | VARIÂNCIA $\sigma^2(m^2)$ | A POSTERIORI |             |                 |
|---------------------------|-------|------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|--------------|-------------|-----------------|
|                           |       |                        |                |                           |                           | $\mu(m)$     | $\sigma(m)$ | $\sigma^2(m^2)$ |
| 360                       | 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                       | 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                      |              |             |                 |

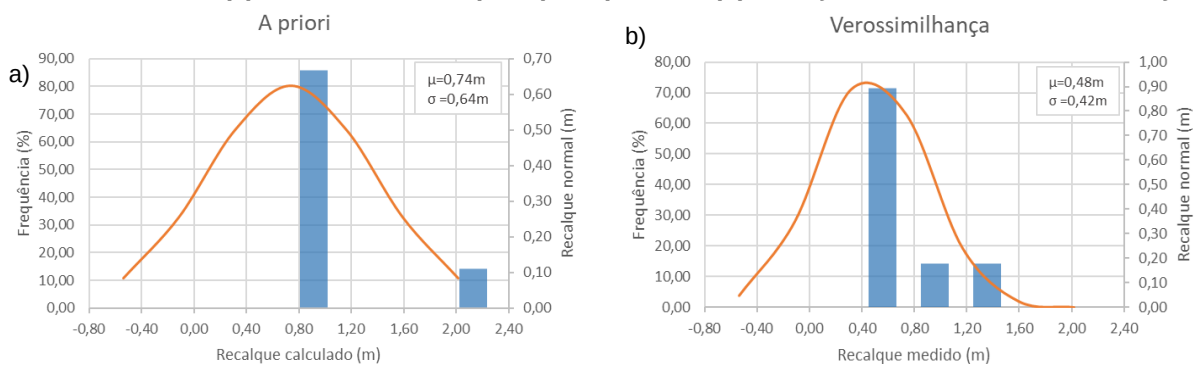
Fonte: Arquivo do autor.



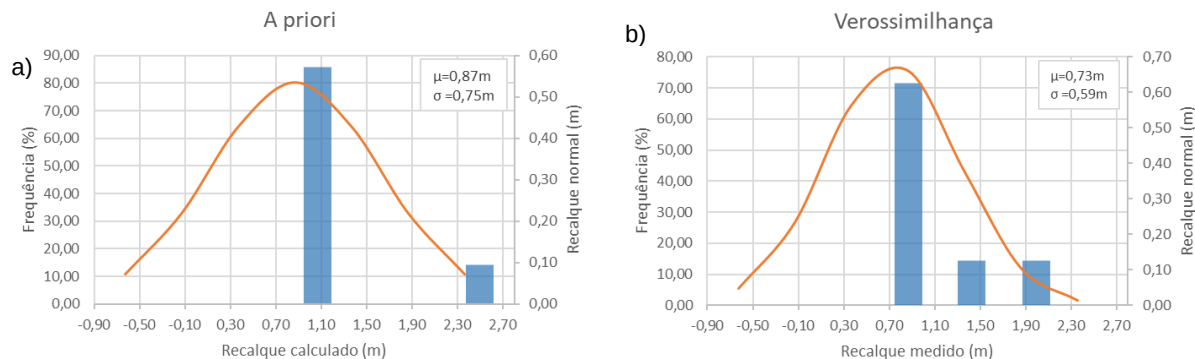
**Figura 60 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 360 dias para o setor sudeste: (a) Mod. de Sowers (1973) – *A priori*; e (b) Aferição de MS – *Verossimilhança*.**



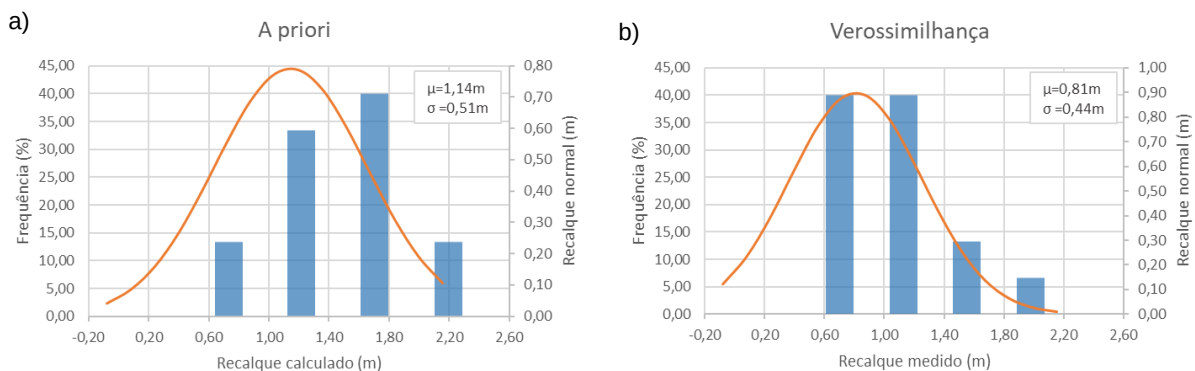
**Figura 61 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 720 dias para o setor sudeste: (a) Mod. de Sowers (1973) – A priori; e (b) Aferição de MS – Verossimilhança.**



**Figura 62 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 360 dias para o setor sudoeste: (a) Mod. de Sowers (1973) – A priori; e (b) Aferição de MS – Verossimilhança.**

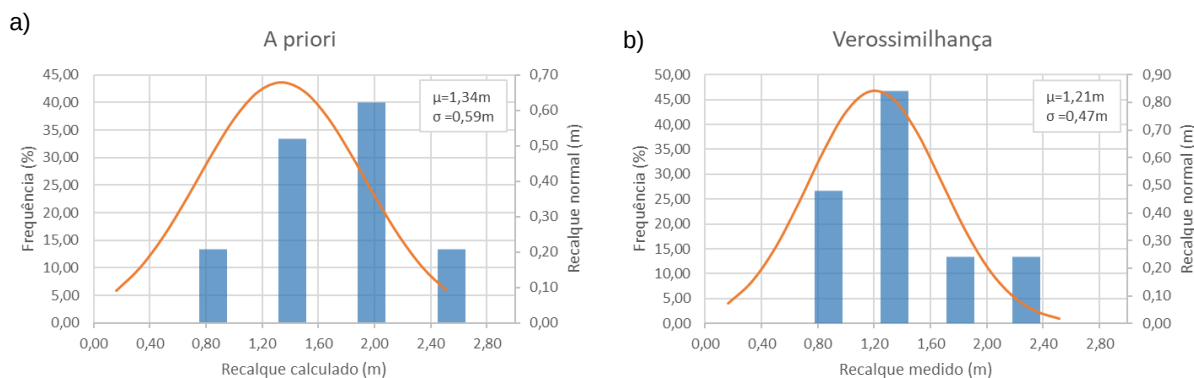


**Figura 63 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 720 dias para o setor sudoeste: (a) Mod. de Sowers (1973) – A priori; e (b) Aferição de MS – Verossimilhança.**



**Figura 64 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 360 dias para o setor norte: (a) Mod. de Sowers (1973) – A priori; e (b) Aferição de MS – Verossimilhança.**





**Figura 65 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 720 dias para o setor norte: (a) Mod. de Sowers (1973) – *A priori*; e (b) Aferição de MS – *Verossimilhança*.**

Nos histogramas apresentados são apontadas as maiores e menores concentrações de frequências ocorridas nos dados. Para o cálculo da quantidade de classes e das linhas de corte de cada uma delas foram levados em consideração os dados máx., mín., tamanho e incremento resultante nos dados considerados.

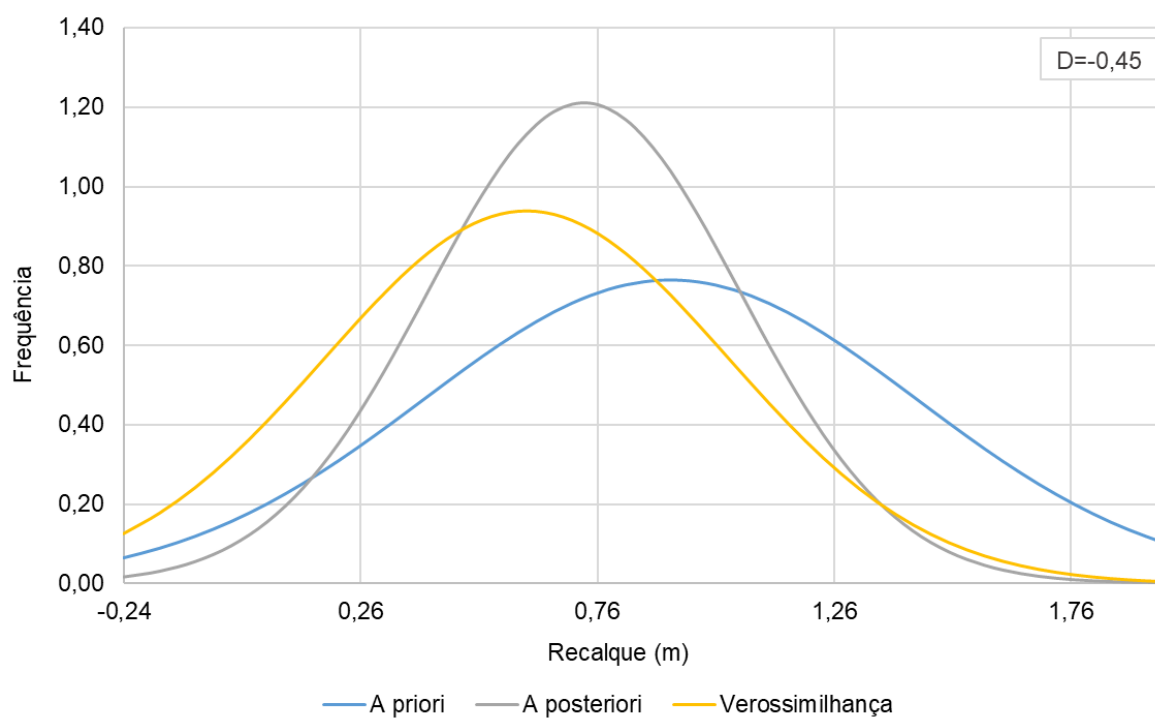
Referente à análise envolvendo todos os setores, observa-se maior aproximação entre a classe de maior frequência e média da distribuição normal nos dados de verossimilhança, em especial no período de 360 dias, onde o histograma indica maior frequência até 0,53m e a normal apresenta média de 0,61m. Essa concentração foi observada em classes de cortes inferiores.

Na análise do setor sudeste é possível verificar maior equilíbrio entre as classes, com ocorrência de duas das três classes com mesma concentração nos dados *a priori* tanto no período de 360 quanto no de 720 dias. A maior proximidade das concentrações com a média da normal nesse caso ocorreu nos parâmetros da análise de 360 dias.

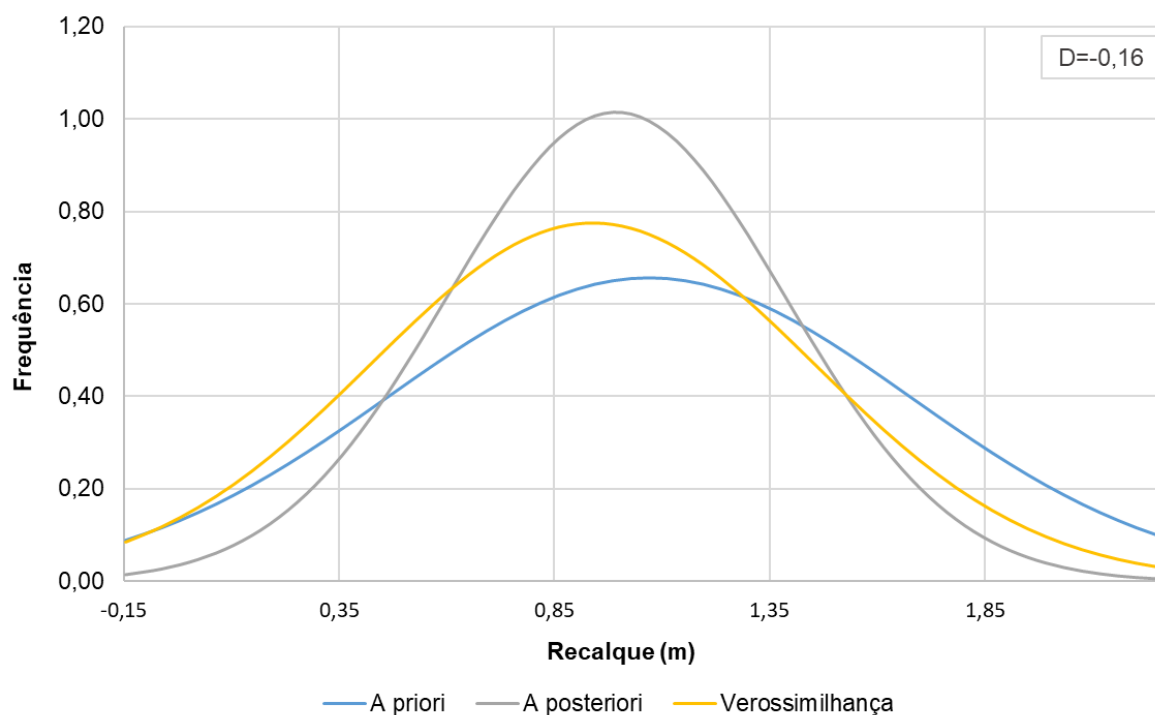
Já o setor sudoeste apresentou maior discrepância entre classes, com a classe inferior contendo pelo menos 71% dos dados em ambas análises de período e parâmetros.

O setor norte, por sua vez, apresentou o maior distanciamento entre a classe de maior concentração de dados e a média da normal, verificado nos dados *a priori*, apesar de ter apresentado boa distribuição de frequência entre as classes.

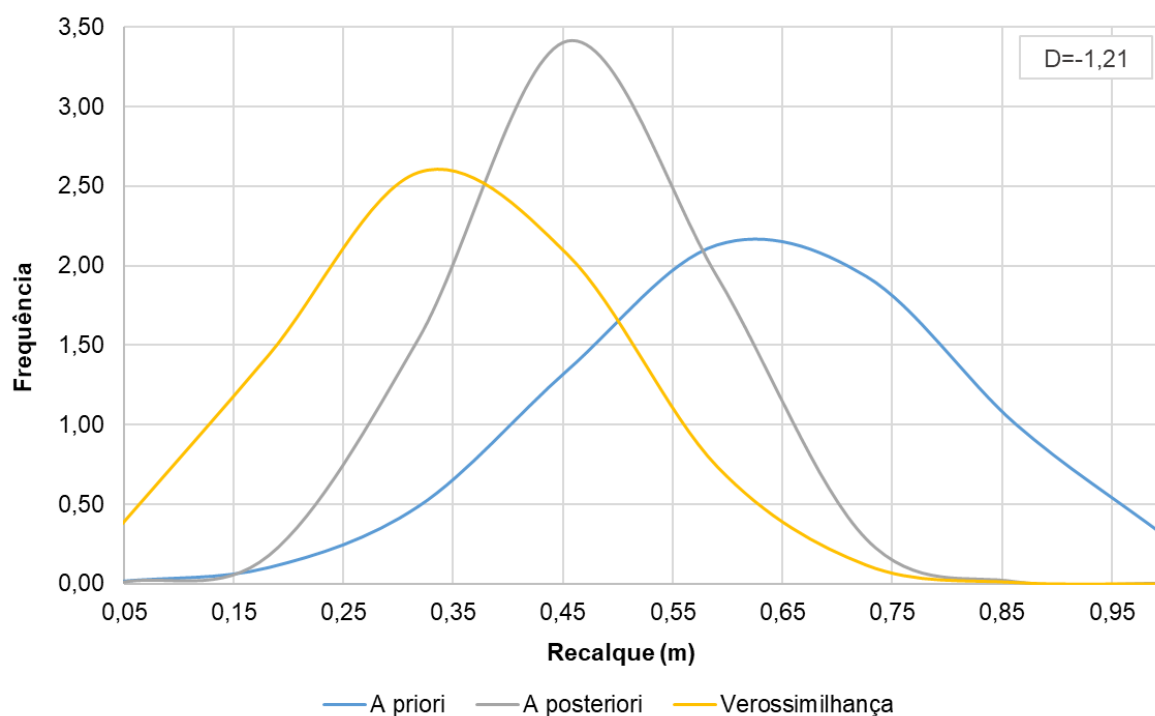
Por fim, foram geradas as curvas atualizadas (*a posteriori*) para cada uma das situações analisadas, e estão apresentadas juntamente com as curvas normalizadas dos dados *a priori* e dos dados de *verossimilhança*.



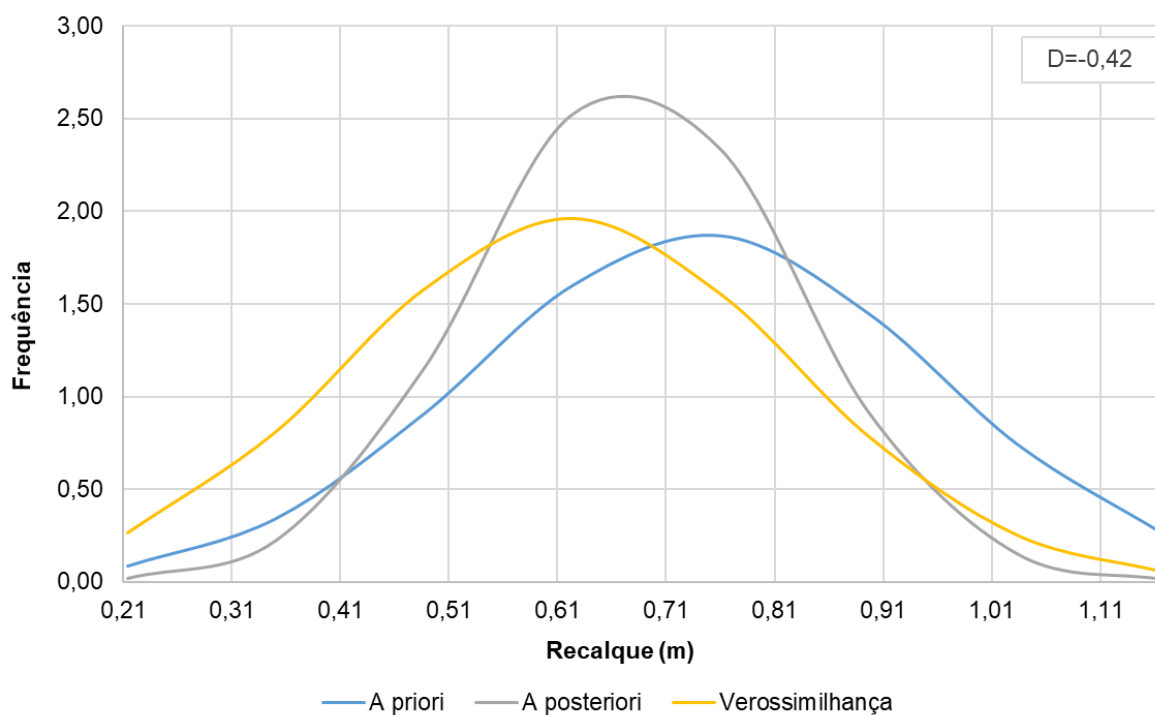
**Figura 66 – Distribuição normal realizada para todos os setores no período de 360 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa *a priori*.**



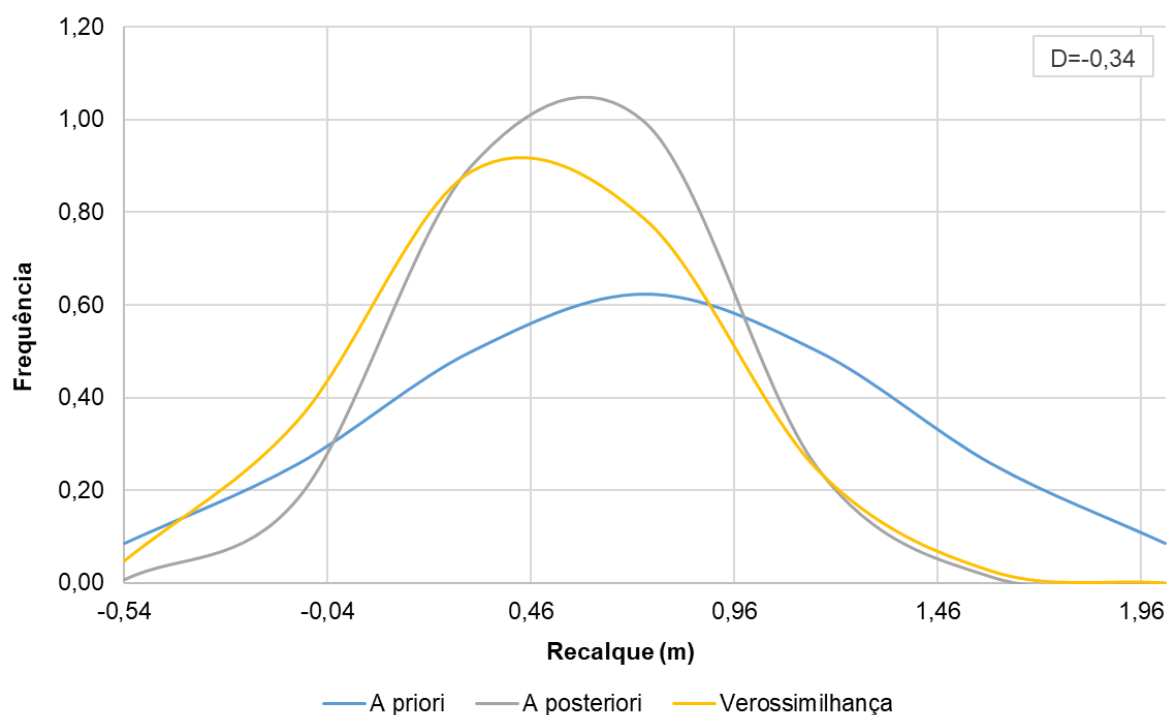
**Figura 67 – Distribuição normal realizada para todos os setores no período de 720 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa *a priori*.**



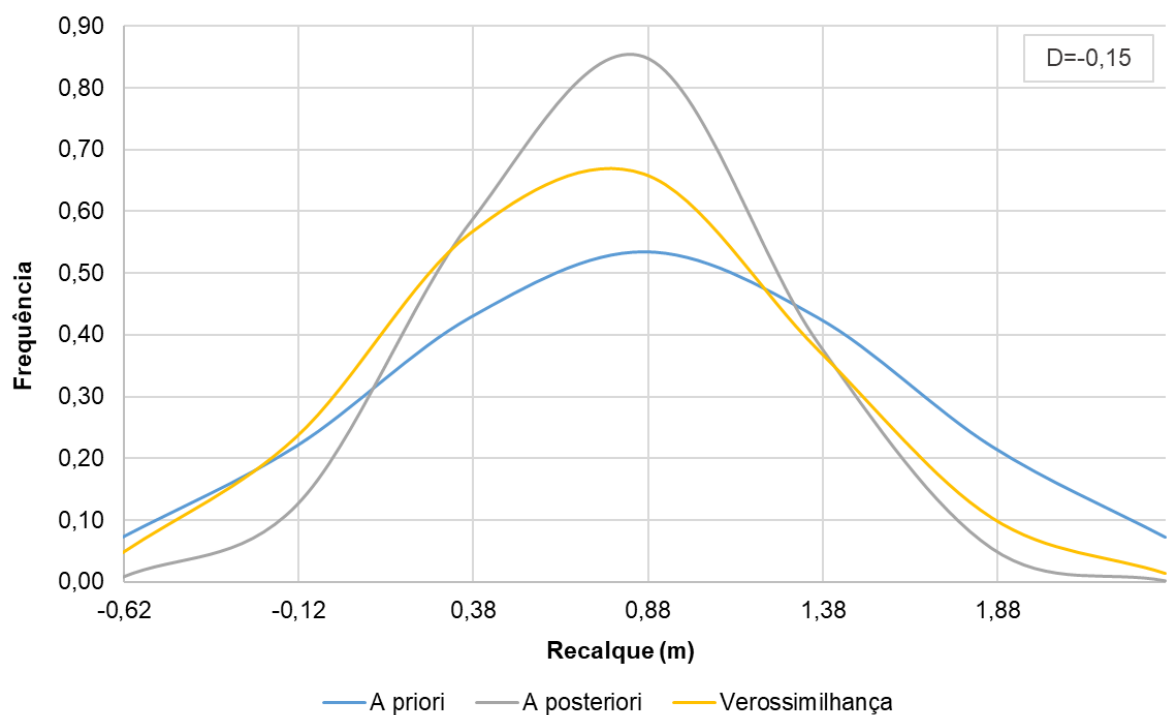
**Figura 68 – Distribuição normal realizada para o setor sudeste no período de 360 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa *a priori*.**



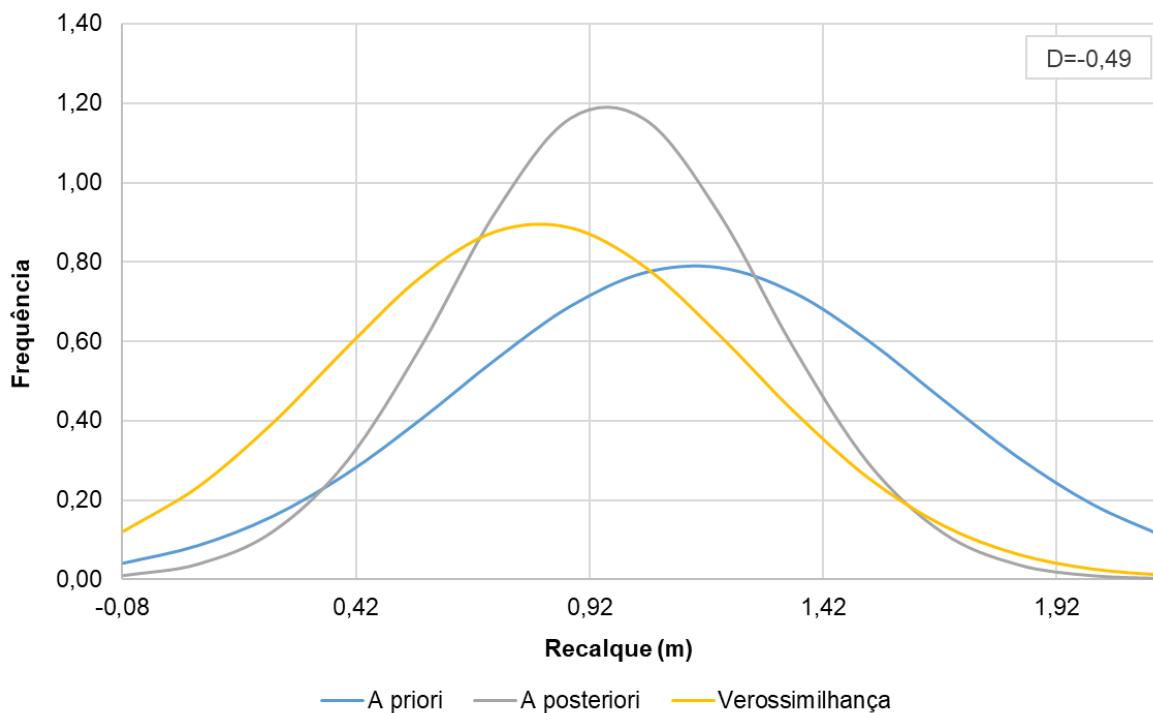
**Figura 69 – Distribuição normal realizada para o setor sudeste no período de 720 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa *a priori*.**



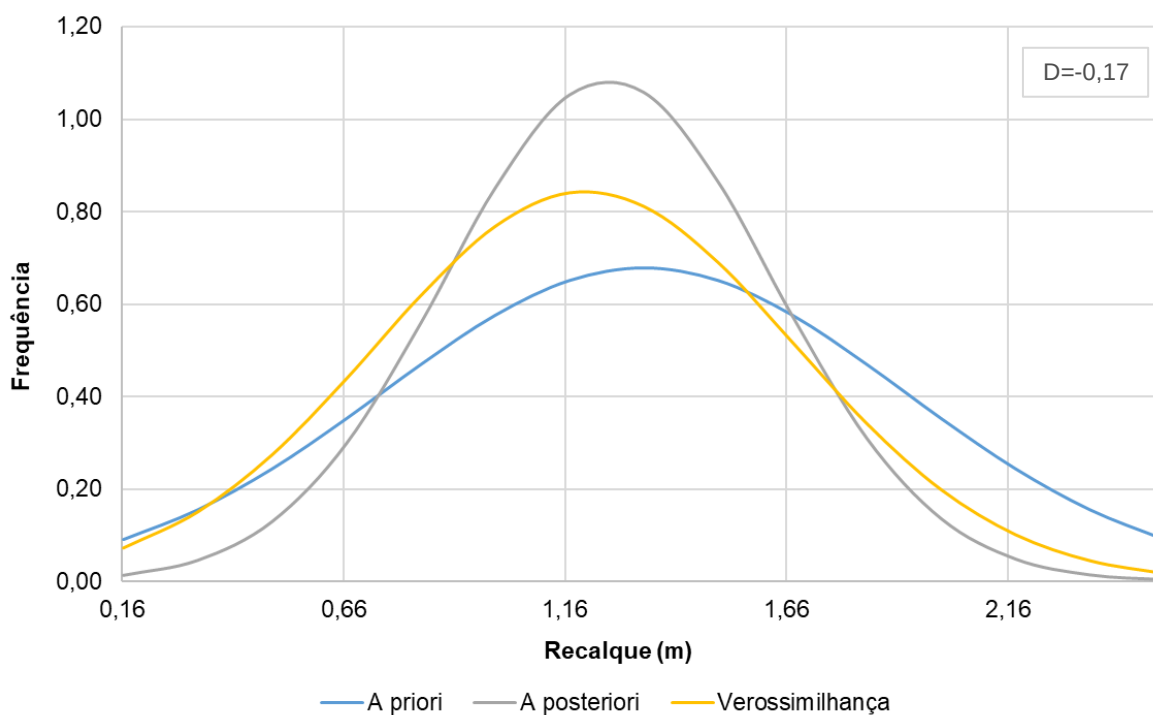
**Figura 70 – Distribuição normal realizada para o setor sudoeste no período de 360 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa *a priori*.**



**Figura 71 – Distribuição normal realizada para o setor sudoeste no período de 720 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa *a priori*.**



**Figura 72 – Distribuição normal realizada para o setor norte no período de 360 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa *a priori*.**



**Figura 73 – Distribuição normal realizada para o setor norte no período de 720 dias, considerando o Mod. de Sowers (1973) como estimativa *a priori*.**

Quando avaliados todos os setores, observa-se uma média mais elevada (0,99) para o cenário de 720 dias, em que a média *a posteriori* se apresenta mais próxima da média dos dados de verossimilhança e dos dados *a priori*.

Esse mesmo comportamento é observado na análise do setor sudeste, embora a ordem de grandeza seja consideravelmente diferente (0,68m) do cenário anterior. No entanto, o maior destaque desse setor se dá pela maior discrepância entre as médias das distribuições consideradas.

No setor Sudoeste, onde a ordem de grandeza da maior média foi de 0,78m, a análise para 720 dias manteve a tendência de maior proximidade entre as médias das distribuições.

O setor Norte se destacou por apresentar média acima da média geral de todos os setores, 1,26. E nele também foi observado maior equiparação entre as curvas de 720 dias.

Adicionalmente, encontra-se em cada análise apresentado de maneira prévia o cálculo do indicador de falha “D” que será melhor detalhado e avaliado no item 6.1, bem como novas observações serão feitas acerca das atualizações obtidas no item 6.2.

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

A Tabela 27 resume os parâmetros obtidos para a aplicação do Teorema de Bayes englobando todos os setores, considerando a distribuição *a priori* como a estimativa de recalque calculada pelo modelo simplificado de Yen e Scanlon (1975) e a função de verossimilhança assumida pelos dados obtidos nos MS em monitoramento mensal.

**Tabela 29 – Parâmetros da distribuição *a posteriori* do recalque para todos os setores a partir do modelo simplificado de Yen e Scanlon (1975).**

| PERÍODO DE ANÁLISE (DIAS) | PARCELA                | MÉDIA $\mu(m)$ | DESVIO PADRÃO $\sigma(m)$ | VARIÂNCIA $\sigma^2(m^2)$ | A POSTERIORI |             |                 |
|---------------------------|------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|--------------|-------------|-----------------|
|                           |                        |                |                           |                           | $\mu(m)$     | $\sigma(m)$ | $\sigma^2(m^2)$ |
| 360                       | <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                      |              |             |                 |
| 720                       | <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                      |              |             |                 |

Fonte: Arquivo do autor.

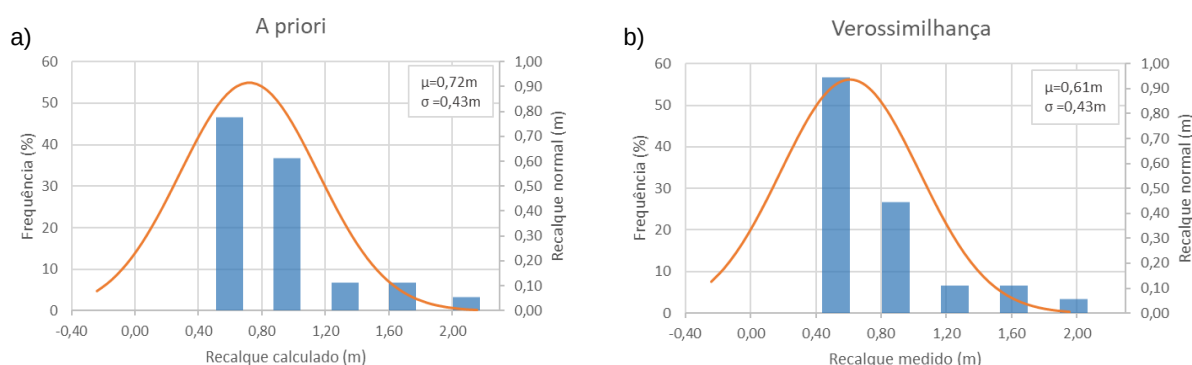
Ao observar os parâmetros obtidos, pode-se perceber em ambos cenários avaliados aqueles resultado dos cálculos pelo modelo simplificado de Yen e Scanlon

se apresentando bastante similares aos medidos, no entanto, enquanto a média para 360 dias indica valor aproximadamente 18% acima da média para os dados medidos, a média para 360 dias indica valores da ordem de 13% abaixo daquelas aferidos em campo.

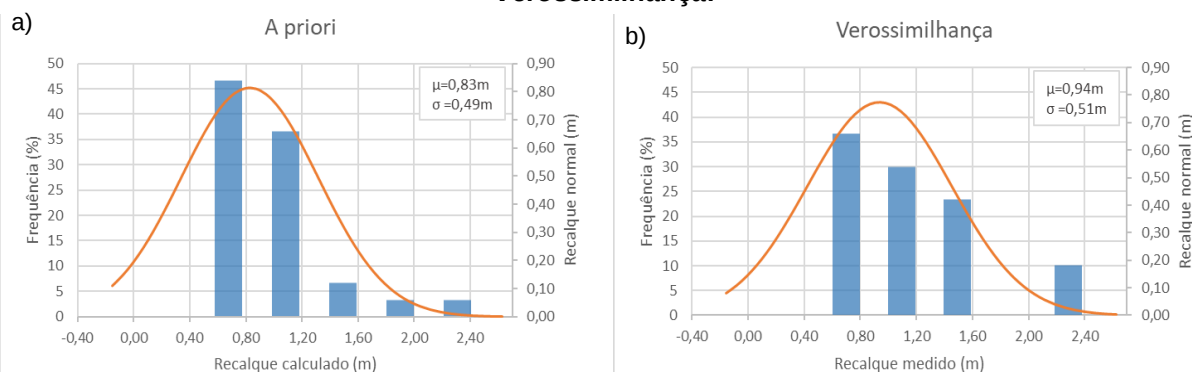
A partir desses parâmetros, foi possível gerar a curva normalizada tanto para os dados de verossimilhança, quanto para os resultados *a priori*.

Apresenta-se na Figura 58 a distribuição normal gerada a partir do Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975) assumido como função *a priori* e da função de verossimilhança obtida a partir das aferições dos marcos superficiais no monitoramento mensal para o período de 360 dias. Enquanto a Figura 59 apresenta os resultados para o período de 720 dias.

Adicionalmente, estão apresentados os histogramas para cada um desses parâmetros analisados.



**Figura 74 - Histograma relacionado com a distribuição normal do recalque no período de 360 dias: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – *A priori*; e (b) Aferição de MS – *Verossimilhança*.**



**Figura 75 - Histograma relacionado com a distribuição normal do recalque no período de 720 dias: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – *A priori*; e (b) Aferição de MS – *Verossimilhança*.**

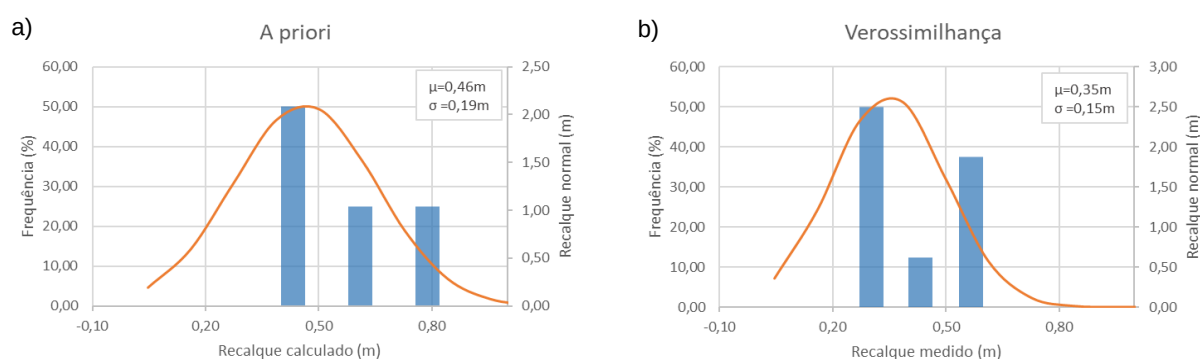
Também foram realizadas as análises desses parâmetros para os três setores identificados separadamente. A Tabela 28 resume os parâmetros obtidos para a

aplicação do Teorema de Bayes para cada setor, considerando a distribuição *a priori* como a estimativa de recalque calculada pelo modelo simplificado de Yen e Scanlon (1975) e a função de verossimilhança assumida pelos dados aferidos nos MS em monitoramento mensal.

**Tabela 30 – Parâmetros da distribuição *a posteriori* do recalque para cada setor a partir do Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975).**

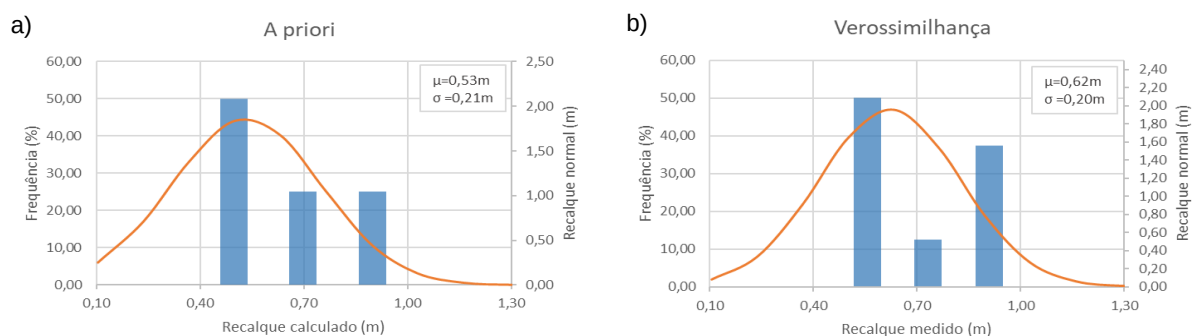
| PERÍODO DE ANÁLISE (DIAS) | SETOR | PARCELA                | MÉDIA $\mu(m)$ | DESVIO PADRÃO $\sigma(m)$ | VARIÂNCIA $\sigma^2(m^2)$ | A POSTERIORI |             |                 |
|---------------------------|-------|------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|--------------|-------------|-----------------|
|                           |       |                        |                |                           |                           | $\mu(m)$     | $\sigma(m)$ | $\sigma^2(m^2)$ |
| 360                       | 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                       | 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.

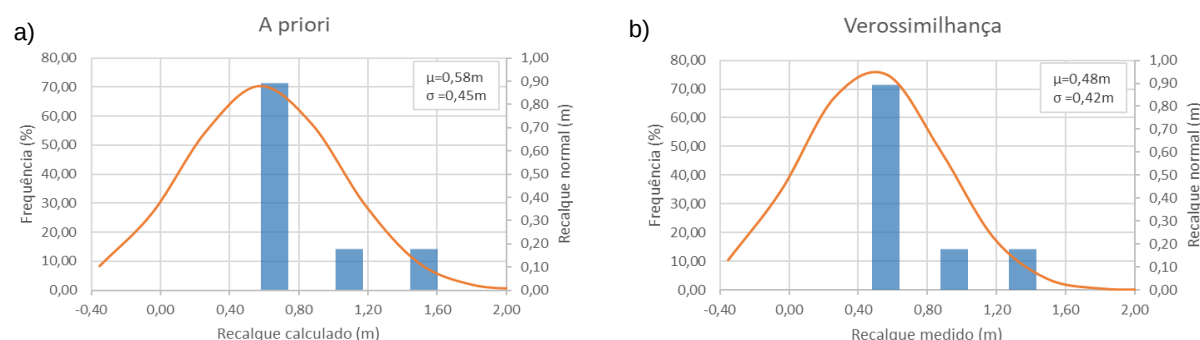


**Figura 76 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 360 dias para o setor sudeste: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – *A priori*; e (b) Aferição de MS – *Verossimilhança*.**

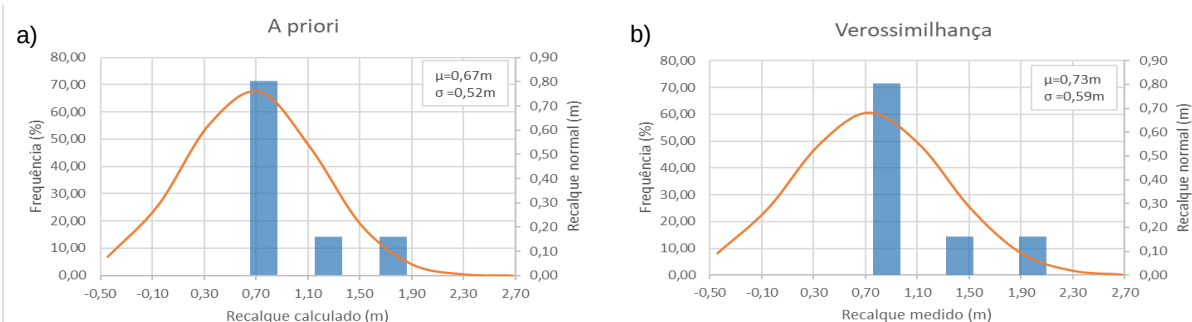




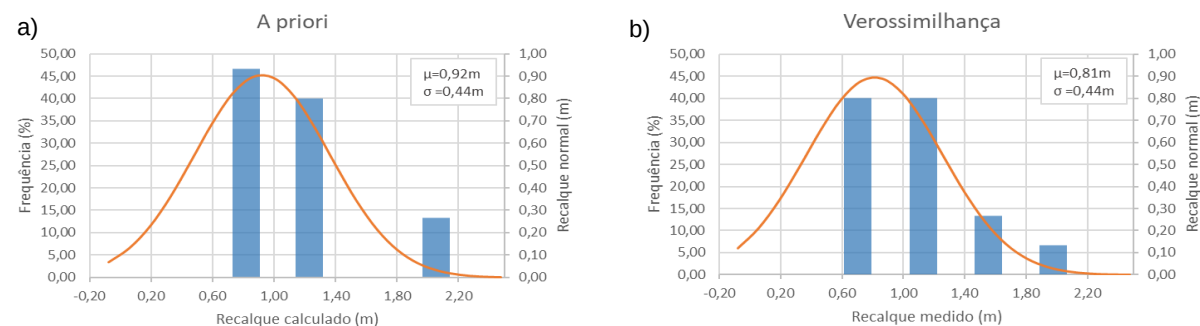
**Figura 77 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 720 dias para o setor sudeste: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – *A priori*; e (b) Aferição de MS – *Verossimilhança*.**



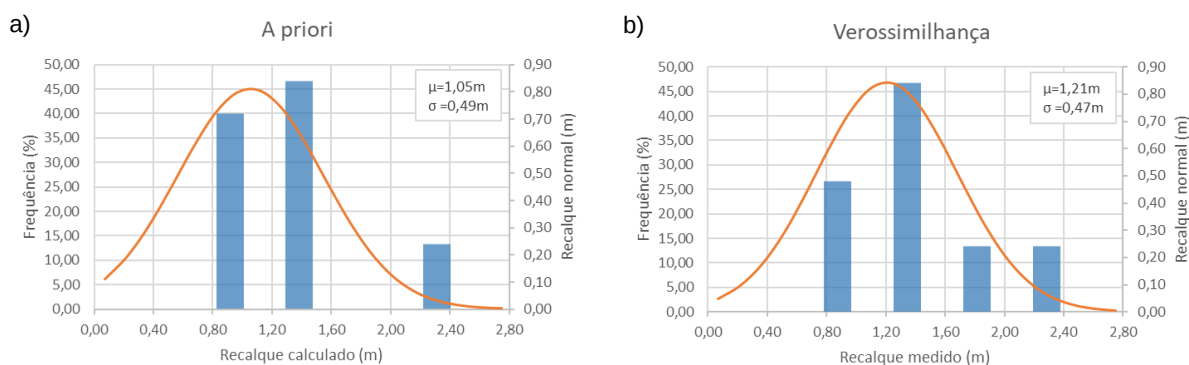
**Figura 78 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 360 dias para o setor sudoeste: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – *A priori*; e (b) Aferição de MS – *Verossimilhança*.**



**Figura 79 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 720 dias para o setor sudoeste: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – *A priori*; e (b) Aferição de MS – *Verossimilhança*.**



**Figura 80 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 360 dias para o setor norte: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – *A priori*; e (b) Aferição de MS – *Verossimilhança*.**



**Figura 81 - Histograma relacionado com a dist. normal do recalque no período de 720 dias para o setor norte: (a) Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) – *A priori*; e (b) Aferição de MS – *Verossimilhança*.**

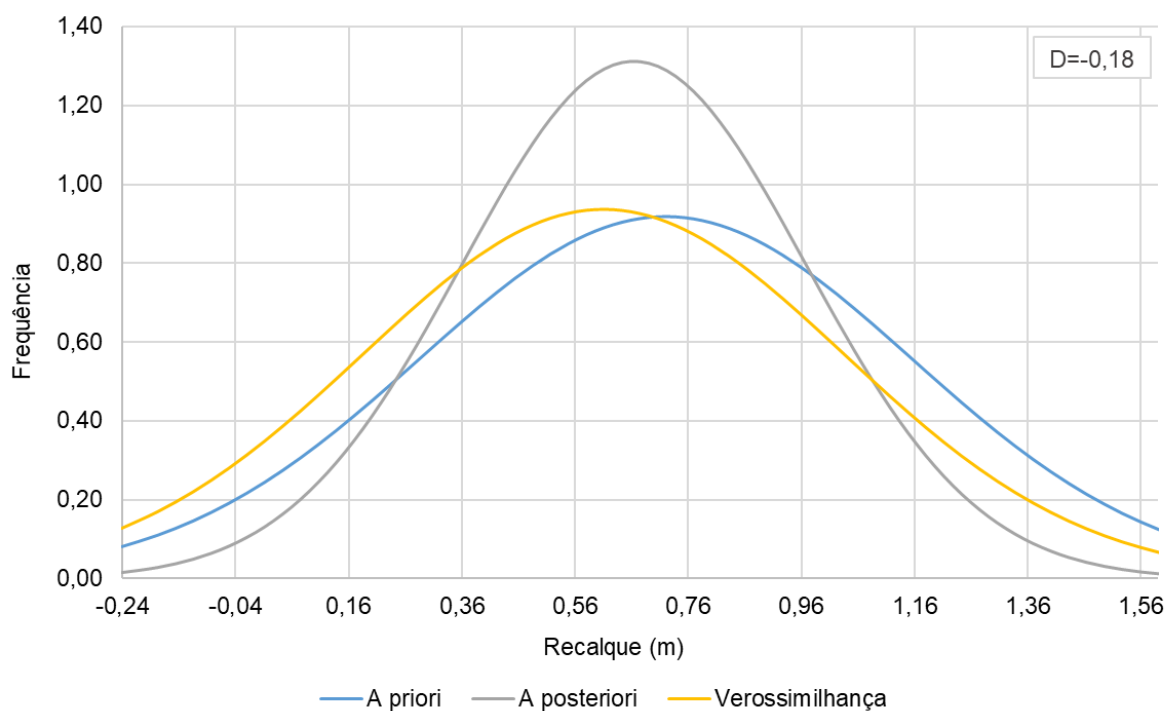
Referente à análise envolvendo todos os setores, observa-se maior aproximação entre a classe de maior frequência e média da distribuição normal nos dados de verossimilhança, em especial no período de 360 dias, onde o histograma indica maior frequência até 0,53m e a normal apresenta média de 0,61m. Os dados *a priori* no período de 720 dias, por sua vez, indicaram maior frequência em 0,68m, enquanto a média indicou 0,83m.

Na análise do setor sudeste é possível verificar maior equilíbrio entre as classes, com ocorrência de duas das três classes com mesma concentração nos dados *a priori* tanto no período de 360 quanto no de 720 dias. A maior proximidade das concentrações com a média da normal nesse caso ocorreu no parâmetro *a priori* tanto na análise para 360 dias quanto para 720 dias.

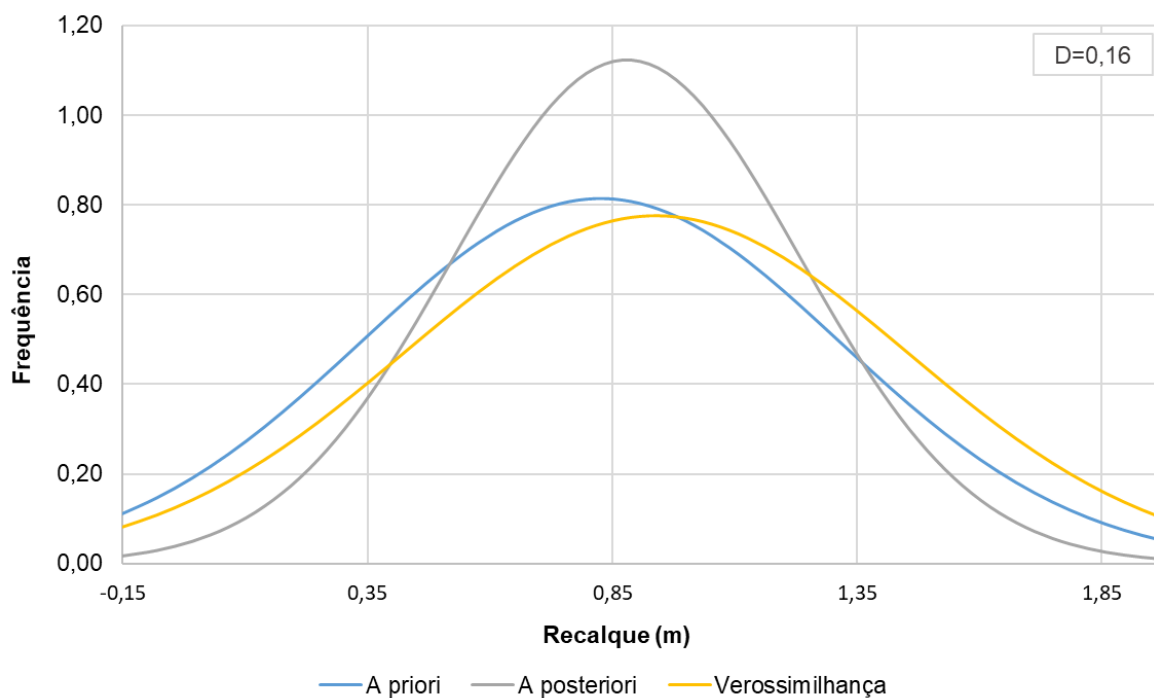
Já o setor sudoeste apresentou maior discrepância entre classes, com a classe inferior contendo pelo menos 71% dos dados em ambas análises de período e parâmetros, enquanto as outras duas apresentam 14,29% cada uma.

O setor norte, por sua vez, apresentou boa aproximação entre a classe de maior concentração de dados (0,82m) e a média da normal (0,92m), verificado nos dados *a priori*, apesar de ter apresentado boa distribuição de frequência entre as classes.

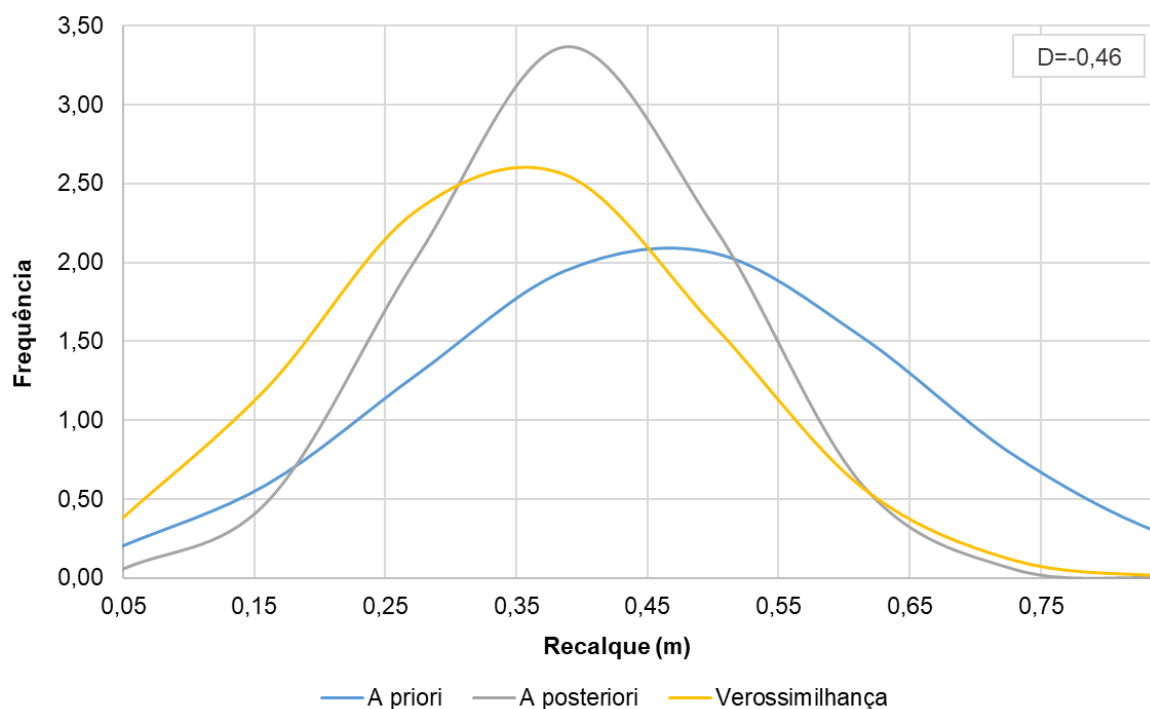
Por fim, foram geradas as curvas atualizadas (*a posteriori*) para cada uma das situações analisadas, e estão apresentadas juntamente com as curvas normalizadas dos dados *a priori* e dos dados de *verossimilhança*.



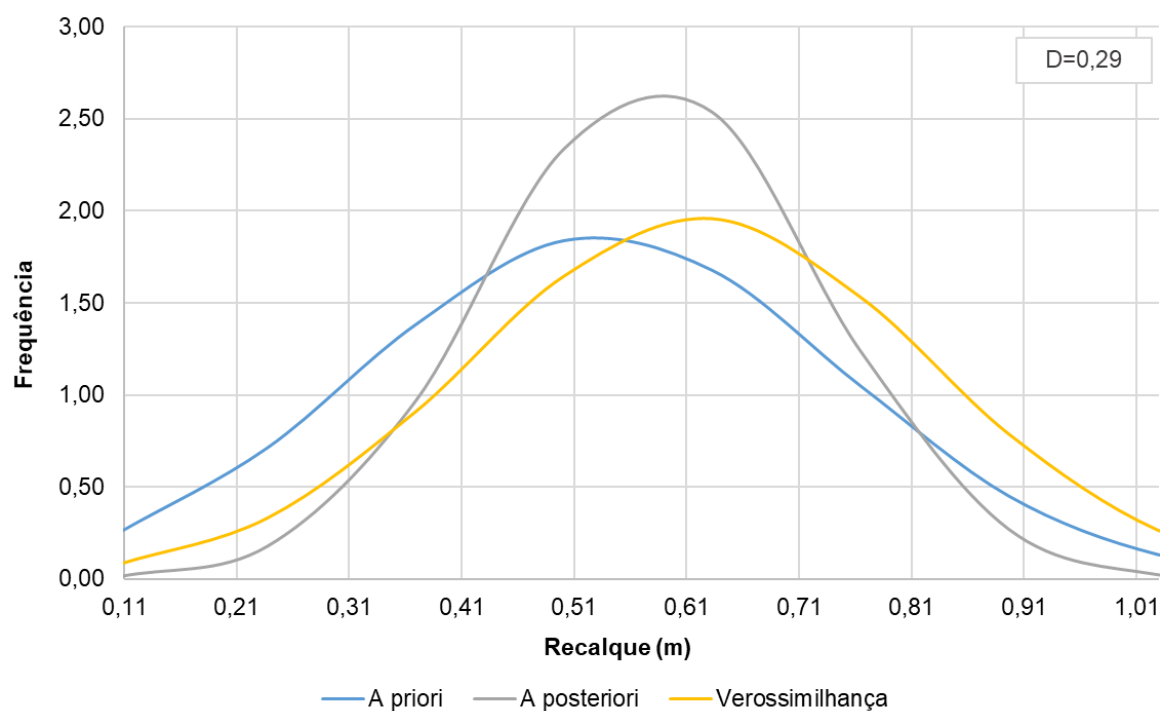
**Figura 82 – Distribuição normal realizada para todos os setores no período de 360 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa *a priori*.**



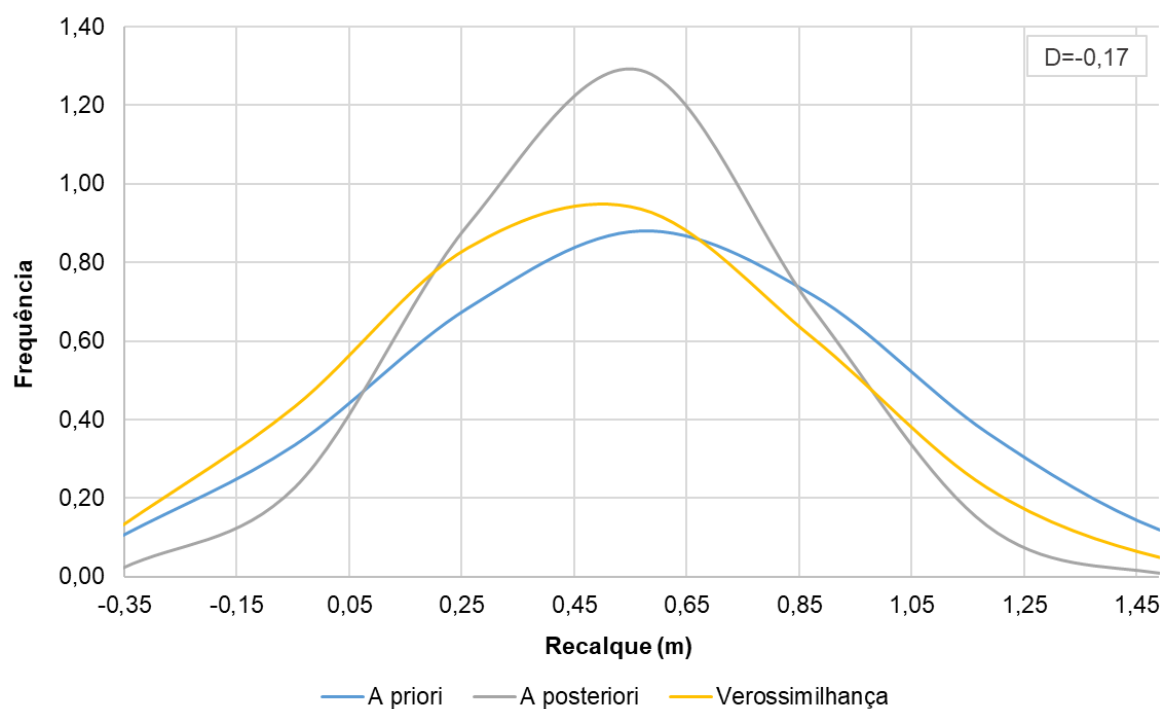
**Figura 83 – Distribuição normal realizada para todos os setores no período de 720 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa *a priori*.**



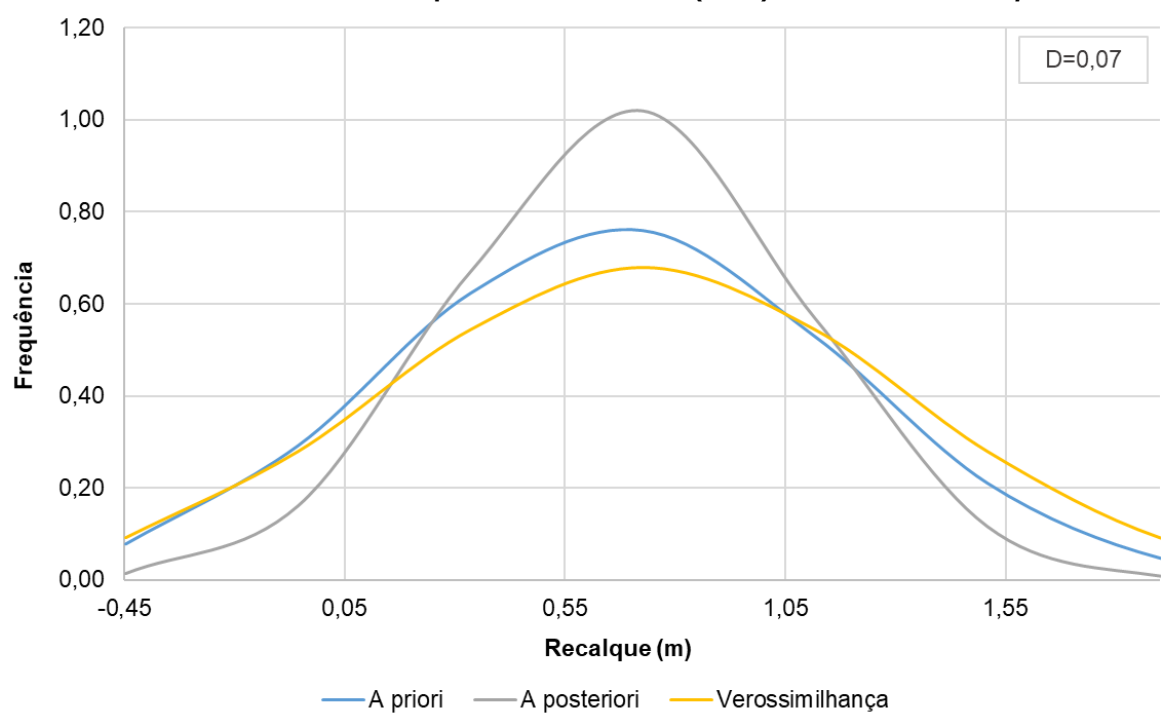
**Figura 84 – Distribuição normal realizada para o setor sudeste no período de 360 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa *a priori*.**



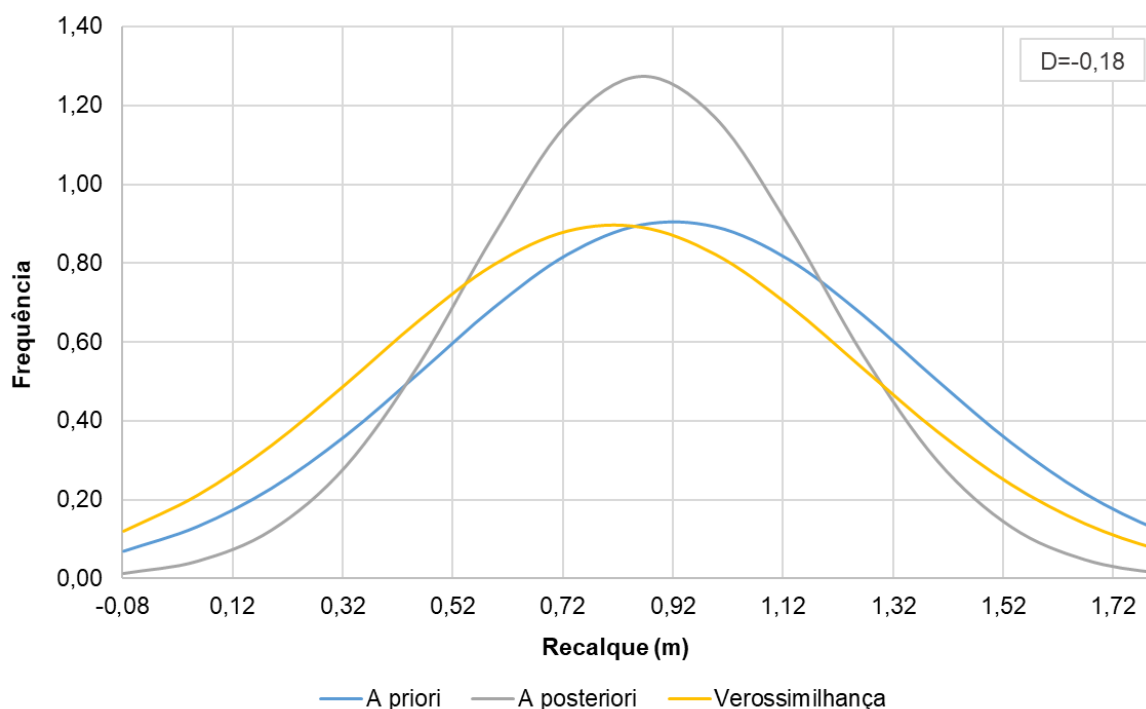
**Figura 85 – Distribuição normal realizada para o setor sudeste no período de 720 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa *a priori*.**



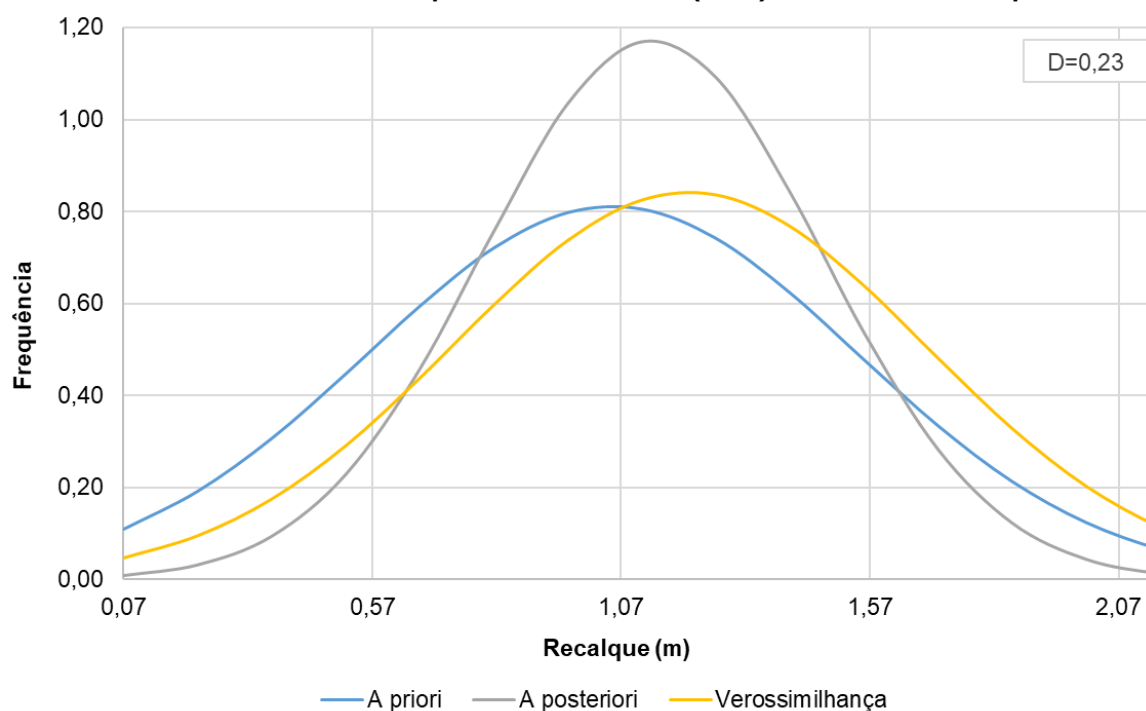
**Figura 86 – Distribuição normal realizada para o setor sudoeste no período de 360 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa *a priori*.**



**Figura 87 – Distribuição normal realizada para o setor sudoeste no período de 720 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa *a priori*.**



**Figura 88 – Distribuição normal realizada para o setor norte no período de 360 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa *a priori*.**



**Figura 89 – Distribuição normal realizada para o setor norte no período de 720 dias, considerando o Mod. Simp. de Yen e Scanlon (1975) como estimativa *a priori*.**

Quando avaliados todos os setores, observa-se uma média mais elevada (0,88) para o cenário de 720 dias, no entanto, na análise para o período de 360 dias a média *a posteriori* (0,66m) se apresenta mais próxima da média dos dados de verossimilhança (0,61m) e dos dados *a priori* (0,72).

Na análise do setor sudeste, as médias também se apresentam bastante próximas, no entanto, não tanto quanto as observadas nos outros setores. No entanto, o maior destaque desse setor se dá pela maior amplitude vertical das curvas, a maior observada nas análises.

No setor Sudoeste, onde a ordem de grandeza da maior média foi de 0,73m na análise de 720 dias. Esta análise se manteve na tendência de maior proximidade entre as médias das distribuições.

O setor Norte se destacou por apresentar média acima da média geral de todos os setores, 1,13. Nele também foi observada boa equiparação entre as curvas, tanto para período de 360 dias quanto para período de 720 dias, com variação apenas entre qual parcela (*a priori* e verossimilhança) apresentou maior média.

Adicionalmente, encontra-se em cada análise apresentado de maneira prévia o cálculo do indicador de falha “D” que será melhor detalhado e avaliado no item 6.1, bem como novas observações serão feitas acerca das atualizações obtidas no item 6.2

## 6 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Verificação da qualidade das atualizações

Segundo Guttormsen (1987), conforme observado no item 1.8, a aplicação da teoria Bayesiana na atualização das estimativas de resistência pode ser verificada através de um indicador de falha, “*failure indicator*”, possibilitando a avaliação da qualidade do resultado calculado. O indicador de falha é representado pela diferença entre a estimativa *a priori* e aquela obtida pela função de verossimilhança, normalizada em relação à raiz quadrada da soma da variância da estimativa *a priori* e da adquirida pela função de verossimilhança.

Utilizando a Equação 1.24, tem-se:

$$D = \frac{\mu_Q^L - \mu_Q^P}{\sqrt{\sigma_Q^{2L} + \sigma_Q^{2P}}}$$

onde:

$\mu_Q^P$  = valor esperado para o dado obtido *a priori*;

$\mu_Q^L$  = valor esperado para o dado obtido pela função de verossimilhança;

$\sigma_Q^{2L}$  = variância da distribuição em função de verossimilhança;

$\sigma_Q^{2P}$  = variância da distribuição *a priori*;

A tabela a seguir exhibe a comparação dos resultados obtidos dos indicadores de falha para as análises realizadas nesta dissertação, considerando os dois modelos semiempíricos adotados, aplicados para os dois períodos analisados (360 e 720 dias) para todos os setores identificados (Sudeste, Sudoeste, Norte e todos juntos).

**Tabela 31 - Indicadores de Falha (D) obtidos nas análises realizadas para os períodos de 360 e 720 dias.**

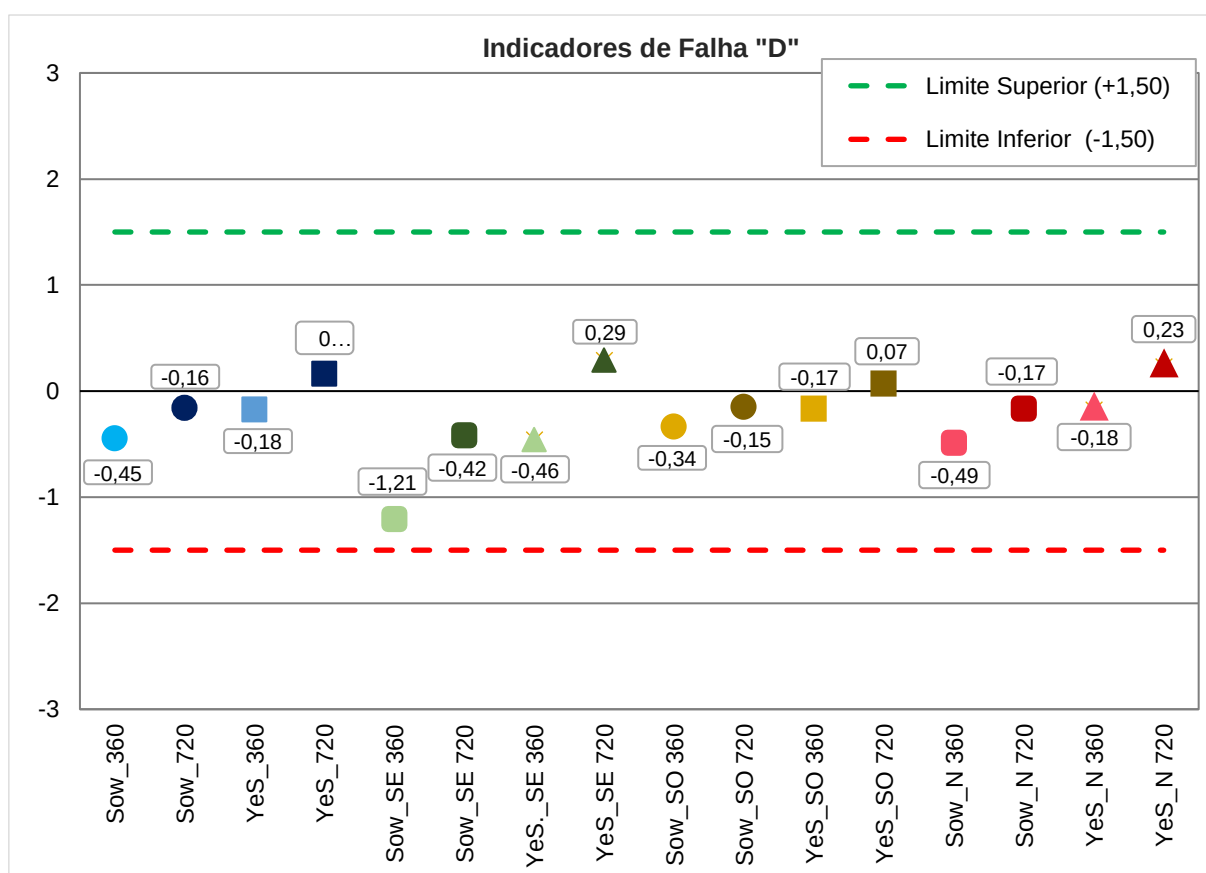
| SETOR   | MÉTODO        | 360 DIAS | 720 DIAS |
|---------|---------------|----------|----------|
| Todos   | Sowers        | -0,45    | -0,16    |
|         | Yen e Scanlon | -0,18    | 0,16     |
| Sudeste | Sowers        | -1,21    | -0,42    |
|         | Yen e Scanlon | -0,46    | 0,29     |



| SETOR    | MÉTODO        | 360 DIAS | 720 DIAS |
|----------|---------------|----------|----------|
| Sudoeste | Sowers        | -0,34    | -0,15    |
|          | Yen e Scanlon | -0,17    | 0,07     |
| Norte    | Sowers        | -0,49    | -0,17    |
|          | Yen e Scanlon | -0,18    | 0,23     |

Fonte: Arquivo do autor

Esses resultados podem ser melhor visualizados no gráfico que apresenta os limites para uma atualização satisfatória.



**Figura 90 - Representação gráfica dos Indicadores de Falha "D" obtidos para as atualizações desse estudo.**

Ao analisar os resultados obtidos, é possível observar que todos os Indicadores de Falha "D" se apresentaram dentro da faixa de valores satisfatórios (entre -1,5 e 1,5). No entanto, é possível observar algumas tendências e divergências entre eles. Os valores obtidos pelo Modelo de Sowers (1973) para o período de 360 dias foram os mais distantes de zero (todos negativos), tanto para os setores unificados quanto para os setores separados, enquanto os valores obtidos pelo Modelo Simplificado de

Yen e Scanlon (1975) foram os mais próximos de zero, e únicos acima de zero (positivos), tanto para os setores unificados, quanto para os setores separados no período de 720 dias.

É possível ainda verificar que 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. Isso pôde ser observado em todos os setores.

Ademais, ao analisar os setores separadamente, pode-se observar que o setor sudeste apresenta a maior dispersão de resultados, com o valor de -1,21 obtido pela formulação de Sowers e 0,29 obtido pela formulação apresentada por Yen e Scanlon. Por outro lado, o setor sudoeste apresenta a menor dispersão de resultados, com o menor valor (-0,34) obtido para o primeiro modelo e o maior valor (0,07) obtido para o segundo método.

Assim, ainda de acordo com as interpretações propostas por Guttormsen (1987):

- Valores de D positivos indicam que a estimativa *a posteriori* será superior àquela obtida *a priori*: Valores obtidos pelo Modelo Simplificado de Yen e Scanlon para o período de 720 dias para os setores unificados (0,16), setor sudeste (0,29), setor sudoeste (0,07) e setor norte (0,23);
- Valores de D negativos indicam que a estimativa *a posteriori* será inferior àquela obtida *a priori*: Valores obtidos pelo Modelo de Sowers para o período de 360 dias para os setores unificados (-0,45), setor sudeste (-1,21), setor sudoeste (-0,34) e setor norte (-0,49); Valores obtidos pelo Modelo de Sowers para o período de 720 dias para os setores unificados (-0,16), setor sudeste (-0,42), setor sudoeste (-0,15) e setor norte (-0,17); e Valores obtidos pelo Modelo Simplificado de Yen e Scanlon para o período de 360 dias para os setores unificados (-0,18), setor sudeste (-0,46), setor sudoeste (-0,17) e setor norte (-0,18).

As variações verificadas, principalmente quando observados os setores separados, provavelmente estão associadas à variação indicada nos valores de recalques dos instrumentos (marcos superficiais) que compõem o setor.

## 6.2 Comparação entre os resultados

Uma análise comparativa será realizada para verificar as particularidades de cada dado e modelo de cálculo na atualização dos recalques dos marcos superficiais.

### 6.2.1 Estimativas *a priori* e função de verossimilhança

Considerando estimativas *a priori*, foram calculados os parâmetros de distribuição normal para os modelos semiempíricos, isto é, as médias, os desvios padrões e os coeficientes de variação para os períodos de 360 e 720 dias, para cada um dos setores analisados, bem como para todos os setores reunidos. De forma análoga, o procedimento foi realizado para a definição dos parâmetros para a função de verossimilhança, tal como pode ser observado abaixo.

**Tabela 32 - Parâmetros da distribuição normal da função de verossimilhança (monitoramento de marcos superficiais) no período de 360 dias para todos os setores.**

| MÉTODO              | SETOR    | MÉDIA $\mu$ (m) | DESVIO PADRÃO $\sigma$ (m) | COEF.VARIAÇÃO $\sigma/\mu$ (m) |
|---------------------|----------|-----------------|----------------------------|--------------------------------|
| Marcos Superficiais | Todos    | 0,61            | 0,43                       | 0,70                           |
|                     | Sudeste  | 0,35            | 0,15                       | 0,43                           |
|                     | Sudoeste | 0,48            | 0,42                       | 0,87                           |
|                     | Norte    | 0,81            | 0,44                       | 0,55                           |

FONTE: Arquivo do autor

**Tabela 33 - Parâmetros da distribuição normal da função de verossimilhança (monitoramento de marcos superficiais) no período de 720 dias para todos os setores.**

| MÉTODO              | SETOR    | MÉDIA $\mu$ (m) | DESVIO PADRÃO $\sigma$ (m) | COEF.VARIAÇÃO $\sigma/\mu$ (m) |
|---------------------|----------|-----------------|----------------------------|--------------------------------|
| Marcos Superficiais | Todos    | 0,94            | 0,51                       | 0,55                           |
|                     | Sudeste  | 0,62            | 0,20                       | 0,33                           |
|                     | Sudoeste | 0,73            | 0,59                       | 0,81                           |
|                     | Norte    | 1,21            | 0,47                       | 0,39                           |

FONTE: Arquivo do autor

**Tabela 34 - Parâmetros da distribuição *a priori* do recalque para os dois modelos analisados no período de 360 dias para todos os setores.**

| MÉTODO                               | SETOR    | MÉDIA $\mu$ (m) | DESVIO PADRÃO $\sigma$ (m) | COEF.VARIAÇÃO $\sigma/\mu$ (m) |
|--------------------------------------|----------|-----------------|----------------------------|--------------------------------|
| Sowers (1973)                        | Todos    | 0,91            | 0,52                       | 0,57                           |
|                                      | Sudeste  | 0,63            | 0,18                       | 0,29                           |
|                                      | Sudoeste | 0,74            | 0,64                       | 0,86                           |
|                                      | Norte    | 1,14            | 0,51                       | 0,44                           |
| Simplificado de Yen e Scanlon (1975) | Todos    | 0,72            | 0,43                       | 0,60                           |
|                                      | Sudeste  | 0,46            | 0,19                       | 0,41                           |
|                                      | Sudoeste | 0,58            | 0,45                       | 0,78                           |
|                                      | Norte    | 0,92            | 0,44                       | 0,48                           |

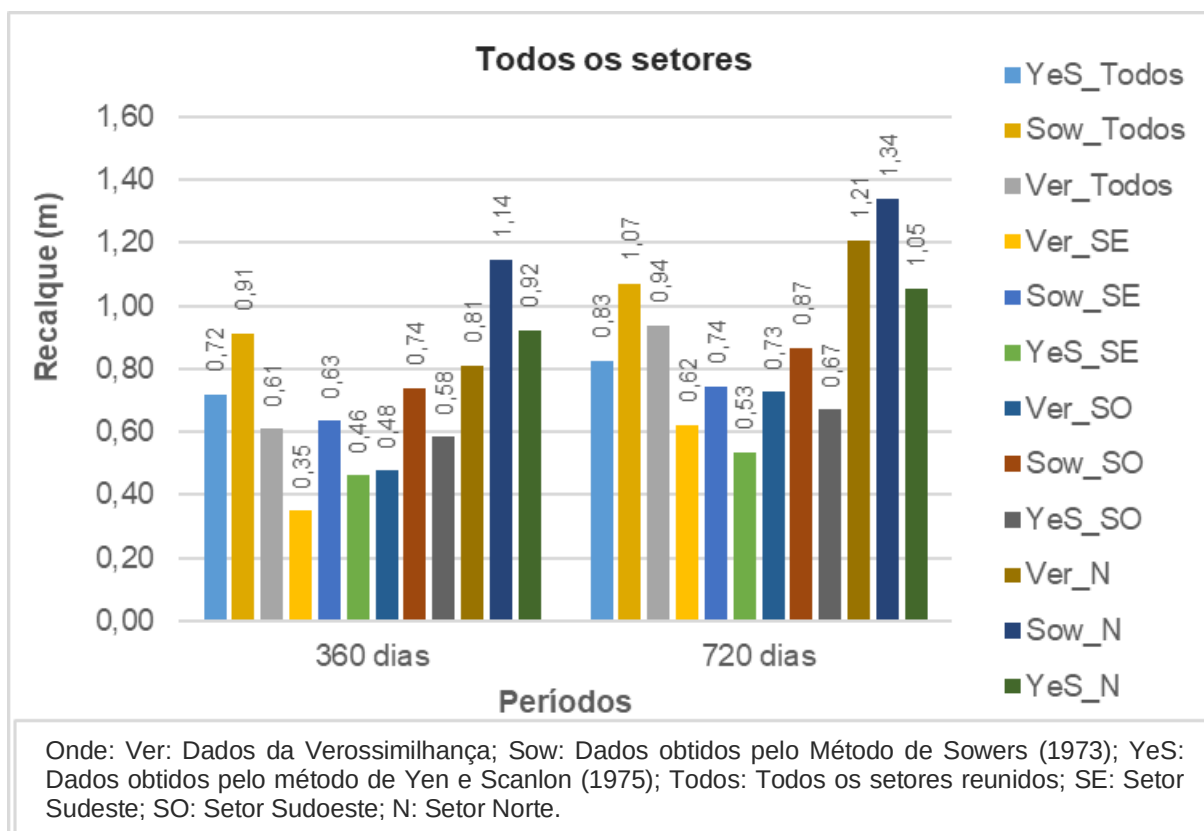
FONTE: Arquivo do autor

**Tabela 35 - Parâmetros da distribuição *a priori* do recalque para os dois modelos analisados no período de 720 dias para todos os setores.**

| MÉTODO                               | SETOR    | MÉDIA $\mu$ (m) | DESVIO PADRÃO $\sigma$ (m) | COEF. VARIAÇÃO $\sigma/\mu$ (m) |
|--------------------------------------|----------|-----------------|----------------------------|---------------------------------|
| Sowers (1973)                        | Todos    | 1,07            | 0,61                       | 0,57                            |
|                                      | Sudeste  | 0,74            | 0,21                       | 0,29                            |
|                                      | Sudoeste | 0,87            | 0,75                       | 0,86                            |
|                                      | Norte    | 1,34            | 0,59                       | 0,44                            |
| Simplificado de Yen e Scanlon (1975) | Todos    | 0,83            | 0,49                       | 0,59                            |
|                                      | Sudeste  | 0,53            | 0,21                       | 0,40                            |
|                                      | Sudoeste | 0,67            | 0,52                       | 0,78                            |
|                                      | Norte    | 1,05            | 0,49                       | 0,47                            |

FONTE: Arquivo do autor

A figura 91 compara as estimativas realizadas pelos dois modelos estudados e os dados das aferições dos marcos superficiais para os dois períodos estudados (360 e 720 dias) a partir de gráficos representativos das médias *a priori* e da função de verossimilhança, de maneira que é possível observar os recalques estimados a partir dos parâmetros calculados.



**Figura 91 - Recalques médios estimados para os marcos superficiais de todos os setores analisados, tendo como base os dois modelos de cálculo utilizados (*a priori*) e os dados de aferição em monitoramento (verossimilhança).**

Observa-se a partir dos dados apresentados que os valores médios obtidos a partir das estimativas calculadas encontram-se razoavelmente próximos àqueles aferidos por ocasião de monitoramento dos marcos superficiais. No entanto, algumas particularidades podem ser observadas. Inicialmente vale observar que a formulação de Sowers apresentou em todos os casos analisados a maior média dentro de cada período, bem como todas as médias do período de 720 dias se apresentaram superiores àquelas obtidas no período de 360 dias, tal como era esperado, visto se tratar de recalque de maciço de resíduos, que exceto por alguma eventualidade específica, tende a evoluir por um certo período de tempo, com posterior estabilização. Ademais, dentro do período de 360 dias a verossimilhança apresentou o menor valor em todas as análises, enquanto esse mesmo fenômeno foi observado para o período de 720 dias referente às médias oriundas da formulação de Yen e Scanlon.

Ao considerar todos os setores reunidos, as médias ficaram entre 0,61m e 0,91m para o período de 360 dias, variação de aproximadamente 50%, com a verossimilhança apresentando o menor valor, enquanto para 720 dias a média variou

entre 0,83m e 1,07m, variação de aproximadamente 30%, com a formulação de Yen e Scanlon apresentando o menor valor.

Já no que se refere ao setor sudeste, as médias apresentaram a maior variação observada, com o período de 360 dias registrando 80% (0,35m-0,63m) e o período de 720 dias indicando 40% (0,53m-0,74m).

O setor norte, por sua vez, apresentou a menor variação observada em ambas análises de períodos, com as extremidades representadas pelo valor obtido da função de verossimilhança (0,81m) e o valor obtido por Sowers (1,14m) no período de 360 dias, totalizando 41% de diferença. Neste caso, o valor obtido a partir da formulação de Yen e Scanlon se aproximou sutilmente da verossimilhança. Já para o período de 720 dias essa diferença foi ainda menor, 27%, apesar de apresentar a maior média verificada, 1,34m (Sowers).

Por fim, o setor sudoeste apresentou médias intermediárias, sendo possível observar a mínima de 0,48m e a máxima de 0,74m no período de 360 dias, cerca de 55% de variação. E no período de 720 dias, aproximadamente 29% (0,67m-0,87m).

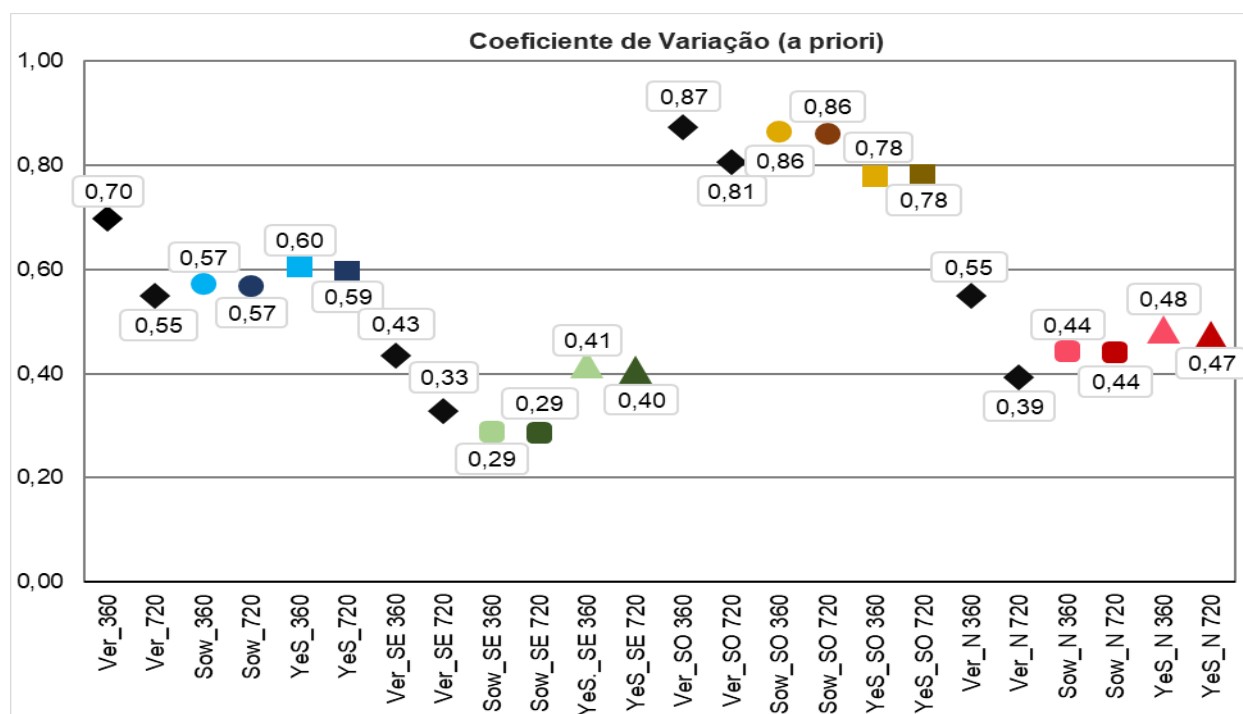
Ao realizar análise comparativa entre os períodos para cada setor, constata-se uma constante de aproximadamente 17% entre as médias máximas (Sowers) de cada período tanto para os setores unificados, quanto para cada setor separado. No entanto, no que se refere as médias mínimas, observa-se uma variação de 29% (norte) a 53% (sudeste), enquanto para o setor sudoeste observou-se 40% e para o todos os setores unificados 35%.

Também foi analisado o comportamento registrado pelo coeficiente de variação, que representa as incertezas envolvidas, tanto entre os modelos utilizados na previsão dos recalques, quanto nos dados aferidos em campo, utilizados na verossimilhança.

A partir do gráfico abaixo é possível observar que os dados *a priori* obtidos a partir do Modelo de Sowers (1973) apresentaram menores coeficientes de variação em comparação com aqueles resultados do Modelo de Yen e Scanlon (1975) em ambos os períodos analisados (360 e 720 dias), exceto no setor Sudoeste. O primeiro método, apresentou mesmo resultado em ambos períodos, enquanto o segundo apresentou sutil redução na maioria dos setores, exceto no setor sudoeste, onde o coeficiente se manteve.

Os menores valores de coeficiente de variação foram registrados para o setor sudeste em ambos períodos para o Modelo de Sowers, enquanto aqueles calculados

pelo mesmo modelo para o setor sudoeste apresentaram os maiores coeficientes, também para ambos períodos. Este resultado indica menor dispersão de recalque observada entre os instrumentos do primeiro setor, em contrapartida, maior dispersão nos do segundo setor citado.



**Figura 92 - Coeficientes de variação obtidos pelos modelos utilizados (*a priori*) nos períodos de 360 e 720 dias.**

O setor sudeste foi também a subdivisão que apresentou a maior diferença de coeficientes entre os métodos, sendo observado entre os valores do período de 360 dias de Sowers (0,29) e o período de 360 dias de Yen e Scanlon (0,41). Enquanto os coeficientes referentes ao período de 720 dias considerando todos os setores pelo Modelo de Yen e Scanlon (1675) apresentou a menor diferença, 0,02.

Ao considerar os coeficientes observados nos dados de verossimilhança, observa-se maior variação na análise entre períodos do que nos dados apresentados pelos métodos, sendo a maior constatada na análise envolvendo todos os setores, 0,15.

### 6.2.2 Atualização *a posteriori*

A atualização dos recalques dos marcos superficiais (*a posteriori*) obtida conforme descrito no item 5, foi feita com base no Teorema de Bayes. Nela foram utilizados os parâmetros analisados anteriormente, considerando as estimativas de

recalque calculadas pelos modelos de Sowers (1975) e de Yen e Scanlon (1975) como distribuição *a priori* e os dados de monitoramento de marcos superficiais como função de verossimilhança. Os resultados atualizados das médias de recalque foram feitos para as análises considerando todos os setores em conjunto, o setor sudeste, o setor sudoeste e o setor norte, respectivamente. O resumo desses resultados está apresentado nas tabelas abaixo.

**Tabela 36 - Parâmetros da distribuição *a posteriori* do recalque para os dois modelos analisados no período de 360 dias para todos os setores.**

| MÉTODO                               | SETOR    | MÉDIA $\mu$ (m) | DESVIO PADRÃO $\sigma$ (m) | COEF. VARIÂÇÃO $\sigma/\mu$ (m) |
|--------------------------------------|----------|-----------------|----------------------------|---------------------------------|
| Sowers (1973)                        | Todos    | 0,73            | 0,33                       | 0,45                            |
|                                      | Sudeste  | 0,47            | 0,12                       | 0,25                            |
|                                      | Sudoeste | 0,56            | 0,35                       | 0,63                            |
|                                      | Norte    | 0,96            | 0,33                       | 0,35                            |
| Simplificado de Yen e Scanlon (1975) | Todos    | 0,66            | 0,30                       | 0,46                            |
|                                      | Sudeste  | 0,39            | 0,12                       | 0,30                            |
|                                      | Sudoeste | 0,53            | 0,31                       | 0,58                            |
|                                      | Norte    | 0,87            | 0,31                       | 0,36                            |

FONTE: Arquivo do autor

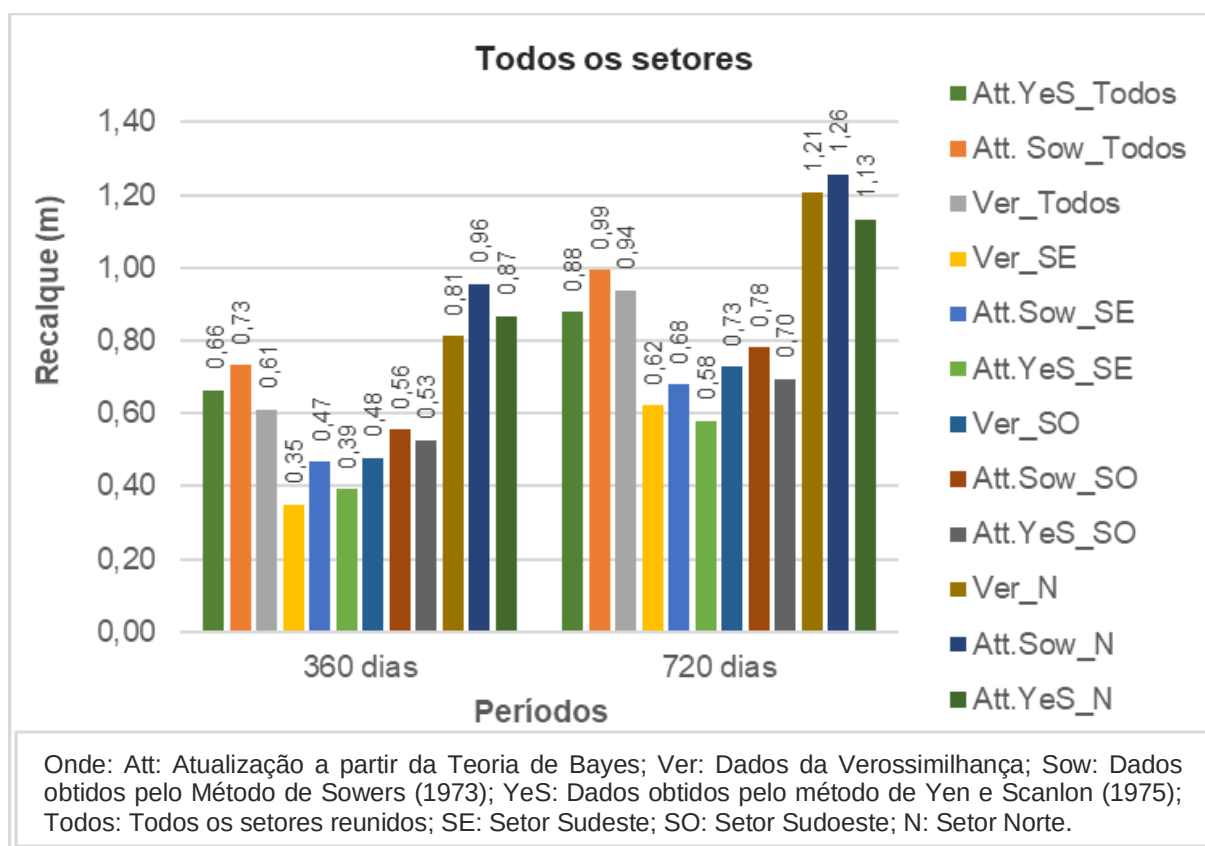
**Tabela 37 - Parâmetros da distribuição *a posteriori* do recalque para os dois modelos analisados no período de 720 dias para todos os setores.**

| MÉTODO                               | SETOR    | MÉDIA $\mu$ (m) | DESVIO PADRÃO $\sigma$ (m) | COEF. VARIÂÇÃO $\sigma/\mu$ (m) |
|--------------------------------------|----------|-----------------|----------------------------|---------------------------------|
| Sowers (1973)                        | Todos    | 0,99            | 0,39                       | 0,40                            |
|                                      | Sudeste  | 0,68            | 0,15                       | 0,22                            |
|                                      | Sudoeste | 0,78            | 0,46                       | 0,59                            |
|                                      | Norte    | 1,26            | 0,37                       | 0,29                            |
| Simplificado de Yen e Scanlon (1975) | Todos    | 0,88            | 0,35                       | 0,40                            |
|                                      | Sudeste  | 0,58            | 0,15                       | 0,25                            |
|                                      | Sudoeste | 0,70            | 0,39                       | 0,56                            |
|                                      | Norte    | 1,13            | 0,34                       | 0,30                            |

FONTE: Arquivo do autor



A figura 93 compara os dois modelos estudados e os dados das aferições dos marcos superficiais atualizados para os dois períodos estudados (360 e 720 dias) a partir de gráficos representativos das médias *a posteriori* e da função de verossimilhança, de maneira que é possível comparar os recalques desenvolvidos através das atualizações realizadas.



**Figura 93 - Recalques atualizados para os marcos superficiais de todos os setores analisados, tendo como base os dois modelos de cálculo utilizados (*a priori*) e os dados de aferição em monitoramento (verossimilhança).**

Observa-se a partir dos dados apresentados que os valores médios obtidos a partir da atualização das estimativas encontram-se razoavelmente próximos àqueles obtidos a partir da aferição por ocasião de monitoramento dos marcos superficiais. No entanto, algumas particularidades podem ser destacadas. Inicialmente vale observar que a formulação de Sowers apresentou em todos os casos analisados a maior média dentro de cada setor.

Segundo a coerência de que recalque de maciço de resíduos, exceto por alguma eventualidade específica, tende a evoluir por um certo período de tempo, com posterior estabilização, todas as médias do período de 720 dias se mantiveram superiores àqueles obtidas no período de 360 dias.

Ademais, dentro do período de 360 dias as atualizações se mostraram superiores à verossimilhança em todas as análises, enquanto as atualizações oriundas da formulação de Yen e Scanlon foram inferiores em todas as análises do período de 720 dias.

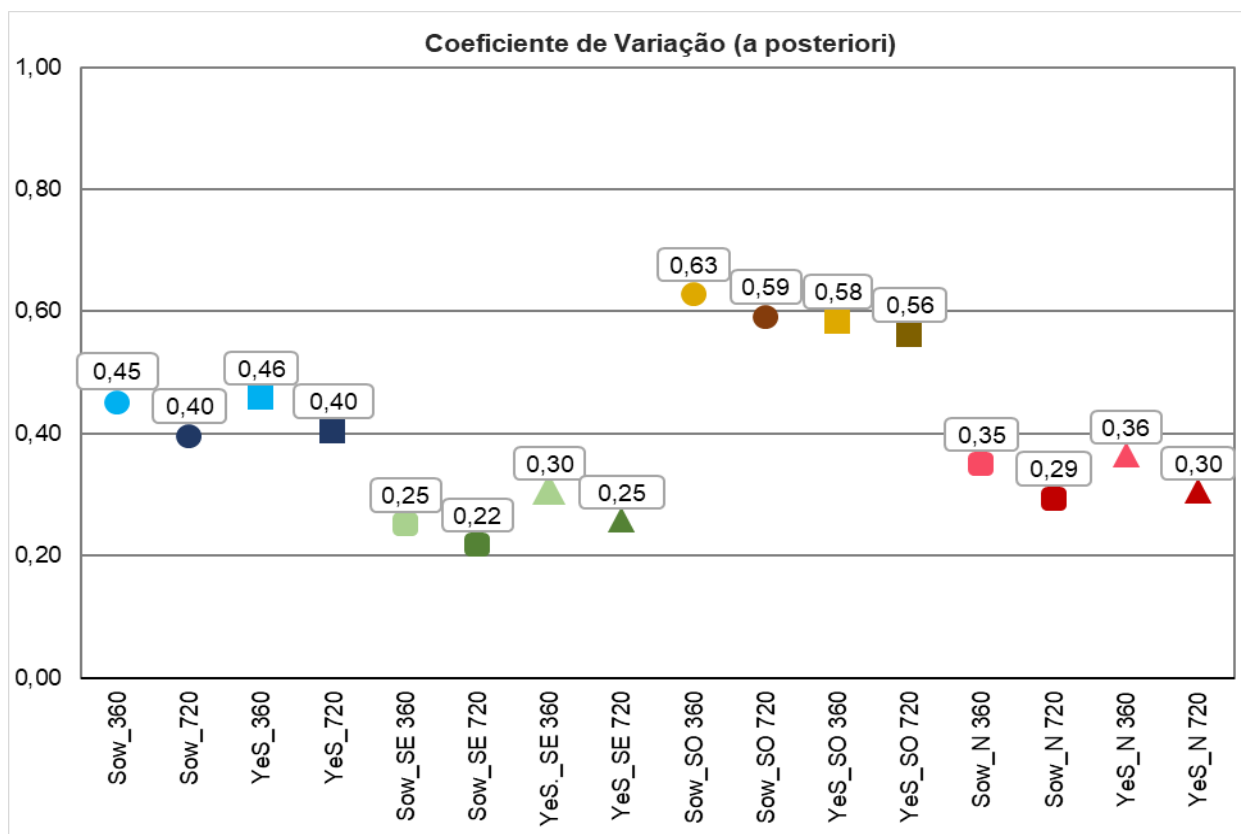
Ao considerar todos os setores reunidos, as médias ficaram entre 0,61m e 0,73m para o período de 360 dias, variação de aproximadamente 20%, com a verossimilhança apresentando o menor valor, enquanto para 720 dias a atualização variou entre 0,88m e 0,99m, variação de aproximadamente 12% (menor observada), com a formulação de Yen e Scanlon apresentando o menor valor (0,88m).

Já no que se refere ao setor sudeste, as atualizações se mantiveram apresentando a maior variação observada, embora em ordem de grandeza inferior àquela observada nas estimativas “*à priori*”, com o período de 360 dias registrando 33% (0,35m-0,47m) e o período de 720 dias indicando 17% (0,58m-0,68m).

Os setores norte e sudoeste, por sua vez, apresentaram variações semelhantes, embora em ordens de grandeza diferentes. Enquanto o setor sudoeste apresentou 14% de variação no período de 360 dias, com média mínima 0,48m e atualização máxima de 0,56m (Sowers), o setor norte apresentou variação de 18%, com mínima de 0,81m e máxima de 0,96m (Sowers) para o mesmo período. Já para o período de 720 dias, o setor sudoeste apresentou variação de 12%, com menor atualização 0,70m (Yen e Scanlon) e maior de 0,78m (Sowers), enquanto o setor norte apresentou variação de 11%, com mínima de 1,13m (Yen e Scanlon) e máxima de 1,26m (Sowers).

Ao realizar análise comparativa entre os períodos para cada setor, não constata-se nenhuma tendência, enquanto as atualizações máximas indicaram discrepância de 28% na análise de todos os setores unificados (menor observada), as análises por setor indicaram 46% (SE), 40% (SO) e 31% (N). No entanto, no que se refere as atualizações mínimas, observa-se uma variação de 39% (norte) a 66% (sudeste), enquanto para o setor sudoeste observou-se 46% e para o todos os setores unificados 44%.

Ao observar os coeficientes de variação gerados a partir da atualização dos recalques, verifica-se 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 dessa dissertação.



**Figura 94 - Coeficientes de variação obtidos pelas atualizações (a posteriori) nos períodos de 360 e 720 dias.**

Comparando-se a Tabela 36 e a Tabela 37, bem como analisando o gráfico resumo delas apresentado na Figura 94 pode-se destacar que, 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.

Considerando as discrepâncias apresentadas pelos modelos para cada período analisado, destaca-se na subdivisão que considera todos os setores que os modelos apresentaram valores bastante similares, com 0,40 obtido tanto a partir de Sowers quanto a partir de Yen e Scanlon para 720 dias, e no período de 360 dias, Sowers resultou em coeficiente apenas 0,01 menor.

Ao observar os resultados a partir de uma certa tendência entre os setores, verifica-se uma quebra no setor sudoeste, no qual é o único em que o Modelo de Yen e Scanlon para o período de 360 dias não apresentou o maior coeficiente de variação do setor.

## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

O autor revisitou conceitos da engenharia geotécnica, em especial da subárea geotecnia ambiental, bem como conceitos básicos de estatística inferencial, a fim de propor um intercâmbio entre as áreas, a partir da aplicação do Teorema de Bayes como contribuição na redução de incertezas na estimativa de recalques em maciços de aterros sanitários. Esta atividade consiste num desafio histórico para profissionais do setor, que gerou ao longo do tempo diversos estudos e teorias que visam, cada um à sua forma, esse aperfeiçoamento, englobando, no entanto, diversos elementos complexos e com elevado grau de incerteza. Para isso, foi utilizado como estudo de caso, uma unidade de tratamento de resíduos com a qual o autor teve larga experiência e aproximação durante anos.

Na busca por esse objetivo, dois modelos foram aplicados ao estudo de caso, a saber: Modelo de Sowers (1973) e Modelo Simp. de Yen e Scanlon (1975). Posteriormente, eles foram utilizados como parcela *a priori* na aplicação do Teorema de Bayes, enquanto os dados de monitoramento mensal de marcos superficiais foram empregados como função de verossimilhança, para então obtenção de uma atualização *a posteriori*.

### 7.1 Conclusões

As principais conclusões obtidas ao longo dessa dissertação estão resumidas a seguir.

- I. Quanto às estimativas *a priori* baseadas nos modelos semiempíricos propostos por Sowers (1973) e Yen e Scanlon (1975):
  - De modo geral, para os modelos estudados, verifica-se coerência entre si, e com os dados aferidos em campo, embora adotem parcelas diferentes referentes a composição do recalque. No entanto, ambos modelos exigiram a realização de calibragem, tendo em vista as diversas características e parâmetros envolvidos num maciço de resíduos sólidos, e para tal, a uso da bibliografia especializada foi fundamental;

- O modelo desenvolvido por Yen e Scanlon apontou para estimativas de recalques para os marcos superficiais (individualmente) inferiores às aquelas calculadas pelo modelo desenvolvido por Sowers (média -17,5% para 360 dias e -19% para 720 dias), assim como às aquelas observadas nas aferições para o período de 720 dias (-12,3%), enquanto para as aferições do período de 360 dias apresentou resultado 26% superior;
- Observando os parâmetros de distribuição calculados verifica-se maiores variâncias ocorrendo no setor sudoeste em ambos períodos analisados e para ambos modelos empregados, o que também fica explícito no desvio padrão. No entanto, referente à média, o setor norte assume os maiores valores. Tais constatações evidenciam que ocorreram características diferentes nos recalques ocorridos na unidade, enquanto o setor sudoeste apresentou a maior diferença de recalque entre os marcos superficiais enquadrados nela (posicionados sobre camadas diferentes), o setor norte apresentou maiores recalques absolutos no geral, sem que a diferença entre os instrumentos se destacasse. Isso pode ocorrer devido alguns fatores, seja operacionais, variação de maquinário e técnica de compactação, interferência de fatores climáticos ou ainda variação nas características dos resíduos, bem como visto na fundamentação teórica as potenciais interferências no comportamento do maciço de resíduos;
- Referente às médias calculadas, aquelas obtidas pela formulação de Sowers apresentaram resultados cerca de 28% superiores às referentes à formulação de Yen e Scanlon para o período de 360 dias, enquanto para o período de 720 dias a diferença foi ainda maior, cerca de 30,5%.
- Na comparação entre os modelos empregados, o coeficiente de variação dos dados *a priori*, de um modo geral, foi maior no Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975), única exceção observada foi no setor sudoeste. Esta observação permite concluir que as estimativas iniciais por esse método associado aos parâmetros adotados apresentaram maiores incertezas na previsão dos recalques;

- O setor sudeste apresentou a maior diferença de coeficientes de variação entre os métodos, sendo observado entre os valores do período de 360 dias de Sowers (0,29) e Yen e Scanlon (0,41), cerca de 40%. Enquanto os coeficientes referentes ao período de 720 dias considerando todos os setores pelo Modelo de Yen e Scanlon (1675) apresentou a menor diferença, 0,02 ou 4%.

## II. Quanto à função de verossimilhança:

- Os coeficientes de variação verificados a partir da função de verossimilhança foram, em média, cerca de 24% maiores em relação às calculadas a partir de Sowers e 12% superiores em relação às calculadas a partir de Yen e Scanlon para o período de 360 dias, enquanto para o período de 720 dias foram 7% superiores em relação a Sowers e 16% inferiores em relação a Yen e Scanlon.

## III. Quanto à estimativa *a posteriori*:

- Em conformidade com o que se espera a partir das formulações matemáticas propostas por Lacasse (1989) e Lacasse *et al* (1991), o recalque obtido *a posteriori* se apresenta sempre entre a faixa de valores obtidos *a priori* e os referentes à função de verossimilhança, se aproximando daquela que apresenta menor variância;
- Os coeficientes de variação das distribuições *a posteriori* se apresentam 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 de variação das distribuições *a posteriori* atualizadas para os dois modelos empregados, apresentam ordens de grandeza similares, com o Modelo de Sowers indicando valores sutilmente menores;
- Os valores de recalques médios apresentam-se razoavelmente próximos aos valores obtidos a partir monitoramento dos marcos superficiais, em ambos períodos analisados, no entanto em escalas de aproximação diferentes, enquanto para o período de 720 dias a diferença não chega a 10%, para o período de 360 dias a maior diferença é observada no setor sudeste, 33%. A diferença de aproximação é ainda mais observada ao comparar os modelos

de cálculo, em que maiores distâncias são observadas nos resultados de Sowers.

#### IV. Quanto aos Indicadores de Falha (D):

- A interpretação dos indicadores de falha (D) demonstra a adequabilidade de resultados com caráter satisfatório;
- Em relação aos indicadores de falha associados aos modelos de cálculo, é possível verificar que os valores obtidos pelo Modelo de Sowers (1973) para o período de 360 dias foram os mais distantes de zero, tanto para os setores unificados quanto para os setores separados, enquanto os valores obtidos pelo Modelo Simplificado de Yen e Scanlon (1975) para o período de 720 dias foram os únicos positivos, tanto para os setores unificados e quando para os setores separados;
- Em relação aos períodos de análise, os valores obtidos pelo Modelo de Sowers para o período de 720 dias apresentam a mesma ordem de grandeza dos valores obtidos pelo de Yen e Scanlon para o período de 360 dias em todos os setores;
- Considerando a análise por setores separadamente, pode-se observar que o setor sudeste apresenta a maior dispersão de resultados, com o valor de -1,21 obtido pela formulação de Sowers e 0,29 obtido pela formulação apresentada por Yen e Scanlon. Por outro lado, o setor sudoeste apresenta a menor dispersão de resultados, com o menor valor (-0,34) obtido para o primeiro modelo e o maior valor (0,07) obtido para o segundo método.
- Foram confirmadas as interpretações prévias propostas por Guttormsen (1987), que diz que valores de “D” positivos indicam que a estimativa *a posteriori* será superior àquela obtida *a priori*, nos resultados obtidos pelo Modelo Simplificado de Yen e Scanlon para o período de 720 dias para os setores unificados (0,16), setor sudeste (0,29), setor sudoeste (0,07) e setor norte (0,23), bem como a interpretação que diz que Valores de “D” negativos indicam que a estimativa *a posteriori* será inferior àquela obtida *a priori*, nos resultados obtidos pelo Modelo de Sowers para o período de 360 dias para os setores unificados (-0,45), setor sudeste (-1,21), setor sudoeste (-0,34) e

setor norte (-0,49); Valores obtidos pelo Modelo de Sowers para o período de 720 dias para os setores unificados (-0,16), setor sudeste (-0,42), setor sudoeste (-0,15) e setor norte (-0,17); e Valores obtidos pelo Modelo Simplificado de Yen e Scanlon para o período de 360 dias para os setores unificados (-0,18), setor sudeste (-0,46), setor sudoeste (-0,17) e setor norte (-0,18).

Diante do exposto ao longo desse estudo e destacado nos tópicos supracitados neste item, pode-se concluir pela adequabilidade da utilização do Teorema de Bayes para a redução de incertezas na previsão de recalques em maciços de aterros sanitários, com sutil favorecimento apresentado pela utilização do Modelo de Sowers (1973) como dado *a priori* em detrimento do Modelo simplificado de Yen e Scanlon (1975).

## 7.2 Sugestões para pesquisas futuras

- I. Extensão do presente estudo para outras unidades de tratamento de resíduos com características diversas;
- II. Utilização de outros métodos semiempíricos e/ou teóricos para avaliação através da metodologia aqui descrita;
- III. Ampliação do banco de dados e maior separação em setores específicos;
- IV. Verificação do uso de distribuições probabilísticas distintas da normal;
- V. Variação da calibração dos modelos matemáticos aqui apresentados, observando os efeitos causados e comparação dos resultados das atualizações a partir deles.



## REFERÊNCIAS

- [1] ABRELPE - Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2022). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*. São Paulo, 2022.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8.419 (1992) – *Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro, 1992.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004 (2004) – *Resíduos sólidos – classificação*. Rio de Janeiro, 2004.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.896 (1997) – *Projeto de aterro de resíduos não perigosos*. Rio de Janeiro, 1997.
- [5] BENJAMIN, J.R. e CORNELL, C.A. (1970). *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*. McGraw-Hill, 1970.
- [6] BENVENUTO, C.; CUNHA, M.A. (1991). Escorregamento em massa de lixo no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS – REGEO'91, v.2.
- [7] BJARNGARD, A.B. (1989). *The compression characteristics of landfills*. Medford. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering ) - Tufts University, Massachusetts.
- [8] BJARNGARD, A.; EDGERS, L. (1990). *Settlement of municipal solid waste landfills*. Annual Madison Waste Conference, University of Wisconsin, Madison.
- [9] BOSCOV, M. E. G. *Geotecnia ambiental*. São Paulo, 2008..
- [10] BOSCOV, M. E. G; ABREU, R.C (2000). *Aterros Sanitários: previsão de desempenho x comportamento real*. ABMS. São Paulo, 2000.
- [11] BOUAZZA, A.; VAN IMPE, W.F.; HAEGEMAN, W. (1996). *Quality control of dynamic compaction in waste fills*. International Congress on Environmental Geotechnics. Japan, 1996.
- [12] BOUAZZA, A.; WOJNAROWICZ, M. (1999). *Geotechnical properties of municipal solid waste and their implications on slope stability analysis of waste*

*piles*. Panamerican conference on soil mechanics and geotechnical engineering. São Paulo, 1999.

- [13] BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. *Novo Marco Legal do Saneamento Básico*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15 jul. 2020. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm).
- [14] BUCCI, M.P.D. (2002). *Direito Administrativo e Políticas Públicas*. São Paulo, Saraiva, 2002.
- [15] 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.
- [16] CARVALHO, M.F. (1999). *Comportamento geotécnico de resíduos sólidos urbanos*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.
- [17] CARVALHO, M.F.; VILAR, O.M. (1998). *In situ tests in urban waste sanitary landfill*. International Congress on Environmental Geotechnics. Portugal, 1998.
- [18] CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F.; BATISTA, H. P.; MARTINS, H. L (2003). *Avaliação da Compactação dos Resíduos Sólidos Urbanos Dispostos no Aterro Sanitário da BR-040 em Belo Horizonte – MG*. Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental - REGEO. Porto Alegre, 2003.
- [19] CATAPRETA, C. A. A (2008). *Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.
- [20] CATERPILLAR (2000). *826G landfill compactor vs. Bomag BC771RB landfill compactor*. Aurora, IL (Report TEXR0327).
- [21] CODUTO, D. P.; HUITRIC, R (1990). *Monitoring landfill movements using precise instruments. Geotechnics of waste fills-theory and practice*. West Conshocken, 1990.

- [22] CORRÊA, L. R. (2017). *Análise de recalque a longo prazo no antigo vazadouro da Marambaia, Nova Iguaçu – RJ*. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.
- [23] COSTA, L. C. (2013). *Estudos Geomecânicos em Compostos de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese (Doutorado) – Programa de Engenharia Civil, COPPE: Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.
- [24] COUMOULOS, D.G.; KORYALOS, T.P.; METAXAS, I.L.; GIOKA, D.A. (1995). *The main landfill of Athens – geotechnical investigation*. International Landfill Symposium – Sardinia. Italy, 1995.
- [25] COUMOLOUS, D.G.; KORYALOS, T.P. (1997). *Prediction of attenuation of landfill settlement rates with time*. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. German, 1997.
- [26] COUMOLOUS, D.G.; KORYALOS, T.P. (1999). *Prediction of long-term settlements behavior of landfill covers after closure*. International Landfill Symposium – Sardinia. Italy, 1999.
- [27] CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (2006). *Mapa Geodiversidade do Brasil: Influência da geologia dos grandes geossistemas no uso e ocupação dos terrenos*. Brasília: 2006a.
- [28] DANTAS, J. G. L. (2007). *Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil*. ABES/PB. Campina Grande, 2007.
- [29] DE LAMARE NETO, A. (2004). *Resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos e de materiais granulares*. Tese (Doutorado) - Programa de Engenharia Civil, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.
- [30] DIXON, N.; JONES, D. R. V. (2005). *Engineering Properties of municipal solid waste*. Portal Komunikacju Naukowej - Geotextiles and geomembranes. UK, 2005
- [31] DENARDIN, G. ´P. (2013). *Estudo dos recalques do aterro sanitário da central de resíduos do Recreio – Minas do Leão/RS*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2013.

- [32] DELLABIANCA, L. M. A; DELLABIANCA, S. M. A; OLIVEIRA, D. R.; GARCIA, H. A. G. (1999). *Análise numérica do recarregamento de uma célula de resíduos sólidos urbanos*. Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental - REGEO. Porto Alegre, 1999.
- [33] DUCHÊNE, P.; VERBRUGGE, J. C.; HUERGO, P. J. (1998). *Stability analysis of a high waste slope*. International Congress on Environmental Geotechnics. Portugal, 1998.
- [34] EID, H.T.; STARK, T.D.; EVANS, W.D.; SHERRY, P.E. (2000). *Municipal solid waste failure I: waste and foundation soil properties; II: stability analysis*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 2000.
- [35] ELK, A. G. P. V; CORRÊA, L. R; RITTER, E. (2017). *Análise de recalques em longo prazo do Vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu, Rio de Janeiro*.
- [36] FARIAS, R. M. S. (2014). *Estudo dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos: uma abordagem experimental e estatística*. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2014.
- [37] GABR, M.A.; VALERO, S.N. (1995). *Geotechnical properties of municipal solid waste*. Geotechnical Testing Journal. ASTM, 1995.
- [38] GACHET, C. ; LEMARÉCHAL, D.; GOTTELAND, P.; PRUDHOMME, B. (1998). *In situ household refuse density measurement protocol*. International Congress on Environmental Geotechnics. Portugal, 1998.
- [39] GANDOLLA, M.; DUGNANI, L.; BRESSI, G.; ACAIA, C. (1992). *The determination of subsidence effects at municipal solid waste disposal sites*. International Solid Wastes Congress. Spain, 1992.
- [40] GANDOLLA, M. et al.(1994). *A determinação dos efeitos do recalque sobre os depósitos de lixo sólido municipal*. Simpósio internacional de destinação do lixo. Salvador, 1994.
- [41] GOMES, L. P.; CONCEIÇÃO, D. C.; FLECK, A (1997). *Avaliação dos recalques em sistemas piloto de aterramento de resíduos sólidos urbanos*. Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Foz do Iguaçu, PR. Anais. Rio de Janeiro, 1997.

- [42] GOMES, L. P.; CAETANO, M. O.; SILVA, G. C. S.; WIRTH, A.; GRONDONA, A. E. B.; DAI-PRÁ, L. B.; SCHMITT, G. T. (2021). *Modelo de regressão linear múltipla para previsão de recalques em aterros sanitários de pequeno porte*. Revista AIDIS, nº3, 2021.
- [43] GOURC, J.P.; THOMAS, S.; VUILLEMIN, M. (1998). *Proposal of waste settlement survey methodology*. International Congress on Environmental Geotechnics. Portugal, 1998.
- [44] GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; SIRINI, P.; TANCREDI, G. (1991). *Geotechnical behaviour of sanitary landfill based on laboratory and in situ tests*. Conferenze di Geotecnica di Torino. Italy, 1991.
- [45] GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; TANCREDI, G. (1995). *The use of triaxial tests for the mechanical characterization of MSW*. International Landfill Symposium – Sardinia. Italy, 1995.
- [46] GUTTORMSEN, T. R. (1987). *Uncertainty of offshore geotechnical engineering: application of Bayesian theory to pile driving predictions*. Recherche Report Societe Nationale. Aquitaine 1995.
- [47] HOSSAIN, M. S.; GABR, M. A. (2005). *Prediction of municipal solid waste landfill settlement with leachate recirculation*. Waste Containment and Remediation. ASCE, 2005.
- [48] IBGE — Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (2008). *Pesquisa Nacional de saneamento Básico (PNSB) de 2008*. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 15 de novembro de 2022.
- [49] IBGE — Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (2017). *Pesquisa Nacional de saneamento Básico (PNSB) de 2020*. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 15 de novembro de 2022.
- [50] INEA - Instituto Estadual do Ambiente. Decreto nº 46.890, de 23 de dezembro de 2019. Dispõe sobre o sistema estadual de licenciamento e demais procedimentos de controle ambiental – SELCA. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 19 dez. 2019. Disponível em: [https://www.inea.rj.gov.br/wpcontent/uploads/2022/03/Decreto\\_46.890\\_2019.pdf](https://www.inea.rj.gov.br/wpcontent/uploads/2022/03/Decreto_46.890_2019.pdf) f.

- [51] IPT — Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1995). *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. Compromisso Empresarial Para Reciclagem (CEMPRE). São Paulo, 2018.
- [52] NEBENZAHL, I. D. B. (2019). *Avaliação dos recalques da fundação de um aterro de resíduos no Município de Capela de Santana/RS*. TCC (Graduação) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.
- [53] JESSBERGER, H.L. (1994). *Geotechnical aspects of landfill design and construction*. Institution of Civil Engineering. London, England, 1994.
- [54] JUCÁ, J. F. T. (2003). *Destinação final dos resíduos sólidos no Brasil: situação atual e perspectivas*. Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO. Porto Alegre, 2003.
- [55] 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*. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.
- [56] KAVAZANJIAN, E.Jr.; MATASOVIC, N., BONAPARTE, R.; SCHMERTMANN, G.R. (1995). *Evaluation of MSW properties for seismic analysis*. International Conference Geoenvironment, New Orleans, Louisiana, 1995.
- [57] KNOCHENMUS, G.; WOJNAROWICZ, M.; VAN IMPE, W.F. (1998). *Stability of municipal solid wastes*. International Congress on Environmental Geotechnics. Portugal, 1998.
- [58] KOCKEL, R.; JESSBERGER, H.L. (1995). *Stability evaluation of municipal solid waste slopes*. European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Denmark, 1995.
- [59] KODA, E. (1998b). *In situ testes of MSW Geotechnical properties*. Symposium on Geotechnics related to the environment green. Portugal, 1998.
- [60] KONIG, D.; JESSBERGER, H.L. (1997). *Waste Mechanics*. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Germany, 1997.

- [61] LACASSE, S., e GOULOIS, A. (1989). *Reliability Analysis of Axial Pile Capacity*. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Anais. Rio de Janeiro, 1989.
- [62] 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.
- [63] LANDVA, A.O.; CLARK, J.I. (1990). *Geotechnics of waste fill. Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1990.
- [64] LIMA, A. C. (2022). *Estudo de caso de estacas metálicas cravadas: comparação de métodos de previsão de capacidade de carga geotécnica com verificação de critérios de projeto e aplicação da teoria Bayesiana*. TCC (Graduação) – Escola Politecnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2022.
- [65] LAMBE. T. W. (1973). *Predictions in soil engineering*. Géotechnique 23 (2).
- [66] LING, H. I. et al. (1998). *Estimation of municipal solid waste landfill settlement*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. Taiwan, 1998.
- [67] LOUREIRO, S.M. (2005). *Índice de Qualidade no Sistema da Gestão Ambiental em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos – IQS*. Dissertação (Mestrado) -. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil (PEC) COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 2005.
- [68] MAHLER, C.F. (2001). *Lixo: as alternativas para transformá-lo em fonte de renda e emprego*. Revista CREA-RJ nº. 33, Rio de Janeiro, 2001.
- [69] MAHLER, C. F. ; SCHUELER, A. S. ; SOARES, E. ; ALVES, I. R. F. S. ; ALMEIDA, J. R. ; ANDRADE, J. C. M. E. ; ROSA, L ; OLIVEIRA, L. B. ; GUIAO JR, R. ; FONSECA, Z. S. (2012). *Lixo Urbano O que você precisa saber sobre o assunto*. 1. Ed, REVAN. Rio de Janeiro, 2012.
- [70] MAIA, H. J. L; BARBOSA, E. M; SILVA, M. M. P. (2016). *Análise nacional e internacional da legislação ambiental sobre resíduos sólidos*. Revista Espacios, vol. 37, 2016.

- [71] MANASSERO, M; VAN IMPE, W.F.; BOUAZZA, A. (1996). *Waste disposal and containment*. International Congress on Environmental Geotechnics. Japan, 1996.
- [72] MARIANO, M. O. H.; JUCÁ, J. F. T. (2000). *Recalques superficiais no aterro da Muribeca– valores medidos e previstos*. Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Seguro, BA. Anais. Rio de Janeiro, 2000.
- [73] MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; NASCIMENTO, J. C. F.; DOURADO, K. A..(2002). *Estudo do comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos sob a influência da biodegradabilidade*. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Bahia, 2002.
- [74] MACHADO, S.L.; KARIMPOUR-FARD, M.; SHARIATMADARI, N.; CARVALHO, M. F.; NASCIMENTO, J. C. F. (2010). *Evaluation of the Geotechnical Properties of MSW in Two Brazilian Landfills*. *Conferences and jornal: Waste Management* 30, 2010.
- [75] MARQUES, A. C. M.(2001). *Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos*. Tese (Doutorado) - Dep. Geotecnia EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.
- [76] MARQUES, A. C. M.; VILAR, O. M.; KAIMOTO, L. S. (2002). *Compactação de resíduos sólidos urbanos*. Solos e Rochas. São Paulo, 2002.
- [77] MENDEZ, G. P. (2021). *Obstáculos da coleta seletiva de resíduos domiciliares na percepção dos atores envolvidos*. Tese (Doutorado) – Programa de Engenharia Civil – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.
- [78] NASCIMENTO, J. C. F. (2007). *Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos: Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.
- [79] MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D.; JUCÁ, J. F. T. (2006). *Recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos associados às condições climáticas, aspectos mecânicos e biológicos*. Solos e Rochas. São Paulo, 2006.
- [80] MORAES, T. S. O. (2022). *Relatório técnico de monitoramento geotécnico*. Rio de Janeiro, 2022.



- [81] NIETIEDT, J. A. (2018). *Análise de confiabilidade de estaqueamento através da teoria bayesiana*. Dissertação (Mestrado) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.
- [82] NIETIEDT, J. A., DANZIGER, B. R., ALMEIDA, M. S. S. (2019). *Bayesian Update of Load Capacity for a Large Steel Piling in a Stratified Soil Profile*. Soils and Rocks. Rio de Janeiro, 2019.
- [83] OLIVEIRA, S. et al. (1998). *Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em Comunidades de médio porte*. FCA/UNESP. Botucatu, 1998.
- [84] OWEIS, I.S.; KHERA, R. (1986). *Criteria for geotechnical construction of sanitary landfills*. International Symposium on Environmental Geotechnology. England, 1986.
- [85] OWEIS, I.S.; KHERA, R.P. (1990). *Geotechnology of waste management*. England, 1990.
- [86] OWEIS, I.S. (2006). *Estimate of landfill settlements due to mechanical and decompositional processes*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, v.132. England, 2006.
- [87] PASSOS, S. de S. (2019). *Contribuição à Confiabilidade de Estacas Tubulares Metálicas na Baixada Fluminense com Aplicação da Teoria Bayesiana*. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Rio de Janeiro, 2019.
- [88] PAUZI, N. I. M; OMAR, H.; HUAT, B. K.; MISRAN, H. (2010). *Settlement model of waste soil for dumping area in Malaysia*. EJGE, 2010.
- [89] PINTO, C.S. (2000). *Curso básico de mecânica dos solos*. São Paulo, 2000.
- [90] PINTO, J. P. C. (2018). *Contribuição à confiabilidade de estacas cravadas através da interpretação de provas de carga dinâmicas com aplicação da teoria bayesiana*. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Rio de Janeiro, 2018.
- [91] RIBEIRO, SG. (2011). *Gestão e Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos*. GERSUP, Palhoça/SC, 2011.

- [92] RICHARDSON, G.; REYNOLDS, D. (1991). *Geosynthetic consideration in a landfill on compressible clays*. Conference on Geosynthetics - Geosynthetics, Atlanta, Georgia, 1991.
- [93] SALAMONI, G. P. D. (2019). *Compressibilidade de resíduos sólidos urbanos devido aos processos de biodegradação em um aterro sanitário*. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2019.
- [94] SANTOS, M. S. (2007). *Inferência Bayesiana na avaliação da segurança de fundações em estacas de deslocamento*. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.
- [95] SANTOS, S. M. (1997). *Propriedades geotécnicas de um aterro de resíduos sólidos*. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 1997.
- [96] SCHOMAKER, N.B. (1972). *Construction techniques for sanitary landfills*. Waste Age Magazine, March/April.
- [97] SILVA, F. H. R. (2010). *Aplicação de modelos numéricos para estimativa de recalques de uma célula do Aterro Sanitário de Belo Horizonte*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.
- [98] SILVA, L. C. (2023). *Estudo de caso da capacidade de carga de estacas metálicas em fundações de torres autoportantes de linhas de transmissão de energia*. TCC (Graduação) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2023.
- [99] SINGH, S.; SUN, J. (1995). *Geotechnical considerations in the seismic response evaluation on municipal solid waste landfills*. Special Session on Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills. California, 1995.
- [100] SIMÕES, G. F. (2000). *Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos*. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2000.

- [101] SOHN, K.C.; LEE, S. (1994). *A method for prediction of long- term settlement of sanitary landfill*. International Congress on Environmental Geotechnics. Canada, 1994.
- [102] SOUZA, C. C.; HEHN, A. V.; GRONDONA, A. E. B.; MIRANDA, L. A. S. (2020). *Uso de redes neurais artificiais na predição da geração de resíduos sólidos urbanos – revisão bibliográfica*. Padrões ambientais emergentes e sustentabilidade dos sistemas 2. Ed. Atena. Ponta Grossa – PR, 2020.
- [103] SOWERS, G.F. (1973). *Settlement of waste disposal fills*. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rússia, 1973.
- [104] TAPAHUASCO, W. F. C. (2005). *Avaliação de modelos de previsão dos recalques dos resíduos sólidos do aterro Jockey Clube de Brasília*. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. UnB, 2005.
- [105] TAPAHUASCO, W. F. C. (2009). *Análise do comportamento de maciços sanitários e proposta de um novo modelo de previsão de recalques considerando a parcela de biodegradação*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Tecnologia Departamentode Engenharia Civil. UnB. 2009.
- [106] TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S.A. (1993). *Integrated solid waste management – engineering principles and management issues*. New York, 1993.
- [107] TEIXEIRA, M. C. (2015). *Previsão e monitoramento de recalques em aterros sanitários, estudo de caso: central de resíduos de recreio – Minas do Leão/ RS e São Leopoldo/ RS*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Maria. RS, 2015.
- [108] WALL, D.K.; ZEISS, C. (1995). *Municipal landfill biodegradation and settlement*. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1995.
- [109] WITHIAN, J.L.; TARVIN, P.A.; BUSHELL, T.D.; SNOW, R.E.; GERMANN, H.W. (1995). *Prediction and Performance of Municipal Landfill Slope*. International Conference Geoenvironment. New Orleans, Louisiana, 1995.
- [110] WORRELL, W.; VESILIND, P. (2011). *Solid Waste Engineering*. Cengage Learning. Stamford, 2011.

- [111] YEN, B.C., SCANLON, B.S. (1975). *Sanitary landfill settlement rates*. Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, 1975.
- [112] ZIMMERMAN, R. E., CHEN, W. H., FRANCKIN, A. G. (1977). *Mathematical model for solid waste settlement*. Geotechnical practice for disposal of solid waste materials. Asce, 1977..

# **APÊNDICE I – PLANILHAS DE CÁLCULO DE RECALQUE PARA CADA MS PELO MODELO DE SOWERS (1973)**

| <b>DIAS</b><br><b>MS</b>   | <b>30</b> | <b>60</b> | <b>90</b> | <b>120</b> | <b>150</b> | <b>180</b> | <b>210</b> | <b>240</b> | <b>270</b> | <b>300</b> | <b>330</b> | <b>360</b> |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>01</b>                  |           |           |           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>Tempo (meses)</b>       | 1,00      | 2,00      | 3,00      | 4,00       | 5,00       | 6,00       | 7,00       | 8,00       | 9,00       | 10,00      | 11,00      | 12,00      |
| <b>Tempo (s)</b>           | 2592000   | 5184000   | 7776000   | 10368000   | 12960000   | 15552000   | 18144000   | 20736000   | 23328000   | 25920000   | 28512000   | 31104000   |
| <b>H (m)</b>               | 6,50      | 6,35      | 6,27      | 6,23       | 6,20       | 6,17       | 6,15       | 6,14       | 6,12       | 6,11       | 6,10       | 6,09       |
| <b>Coef. de comp. sec.</b> | -0,039    | -0,039    | -0,039    | -0,039     | -0,039     | -0,039     | -0,039     | -0,039     | -0,039     | -0,039     | -0,039     | -0,039     |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,154    | -0,229    | -0,273    | -0,303     | -0,327     | -0,346     | -0,362     | -0,376     | -0,389     | -0,400     | -0,410     | -0,419     |
| <b>02</b>                  |           |           |           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>Tempo (meses)</b>       | 1,00      | 2,00      | 3,00      | 4,00       | 5,00       | 6,00       | 7,00       | 8,00       | 9,00       | 10,00      | 11,00      | 12,00      |
| <b>Tempo (s)</b>           | 2592000   | 5184000   | 7776000   | 10368000   | 12960000   | 15552000   | 18144000   | 20736000   | 23328000   | 25920000   | 28512000   | 31104000   |
| <b>H (m)</b>               | 7,95      | 7,71      | 7,59      | 7,52       | 7,47       | 7,44       | 7,41       | 7,38       | 7,36       | 7,34       | 7,32       | 7,31       |
| <b>Coef. de comp. sec.</b> | -0,051    | -0,051    | -0,051    | -0,051     | -0,051     | -0,051     | -0,051     | -0,051     | -0,051     | -0,051     | -0,051     | -0,051     |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,243    | -0,361    | -0,429    | -0,477     | -0,514     | -0,544     | -0,569     | -0,590     | -0,610     | -0,627     | -0,642     | -0,656     |
| <b>03</b>                  |           |           |           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>Tempo (meses)</b>       | 1,00      | 2,00      | 3,00      | 4,00       | 5,00       | 6,00       | 7,00       | 8,00       | 9,00       | 10,00      | 11,00      | 12,00      |
| <b>Tempo (s)</b>           | 2592000   | 5184000   | 7776000   | 10368000   | 12960000   | 15552000   | 18144000   | 20736000   | 23328000   | 25920000   | 28512000   | 31104000   |
| <b>H (m)</b>               | 14,00     | 13,83     | 13,75     | 13,70      | 13,67      | 13,64      | 13,62      | 13,60      | 13,59      | 13,57      | 13,56      | 13,55      |
| <b>Coef. de comp. sec.</b> | -0,020    | -0,020    | -0,020    | -0,020     | -0,020     | -0,020     | -0,020     | -0,020     | -0,020     | -0,020     | -0,020     | -0,020     |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,167    | -0,249    | -0,297    | -0,330     | -0,357     | -0,378     | -0,396     | -0,412     | -0,425     | -0,438     | -0,449     | -0,459     |
| <b>04</b>                  |           |           |           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>Tempo (meses)</b>       | 1,00      | 2,00      | 3,00      | 4,00       | 5,00       | 6,00       | 7,00       | 8,00       | 9,00       | 10,00      | 11,00      | 12,00      |
| <b>Tempo (s)</b>           | 2592000   | 5184000   | 7776000   | 10368000   | 12960000   | 15552000   | 18144000   | 20736000   | 23328000   | 25920000   | 28512000   | 31104000   |
| <b>H (m)</b>               | 29,53     | 29,36     | 29,28     | 29,23      | 29,19      | 29,17      | 29,15      | 29,13      | 29,11      | 29,10      | 29,08      | 29,07      |
| <b>Coef. de comp. sec.</b> | -0,009    | -0,009    | -0,009    | -0,009     | -0,009     | -0,009     | -0,009     | -0,009     | -0,009     | -0,009     | -0,009     | -0,009     |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,168    | -0,252    | -0,301    | -0,335     | -0,362     | -0,384     | -0,402     | -0,418     | -0,433     | -0,445     | -0,457     | -0,467     |

| MS \ DIAS           | 390      | 420      | 450      | 480      | 510      | 540      | 570      | 600      | 630      | 660      | 690      | 720      |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>01</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 6,08     | 6,07     | 6,07     | 6,06     | 6,05     | 6,05     | 6,04     | 6,03     | 6,03     | 6,02     | 6,02     | 6,01     |
| Coef. de comp. sec. | -0,039   | -0,039   | -0,039   | -0,039   | -0,039   | -0,039   | -0,039   | -0,039   | -0,039   | -0,039   | -0,039   | -0,039   |
| Rec. Secundário (m) | -0,427   | -0,435   | -0,442   | -0,448   | -0,455   | -0,461   | -0,466   | -0,472   | -0,477   | -0,481   | -0,486   | -0,490   |
| <b>02</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 7,29     | 7,28     | 7,27     | 7,26     | 7,25     | 7,24     | 7,23     | 7,22     | 7,21     | 7,20     | 7,20     | 7,19     |
| Coef. de comp. sec. | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   |
| Rec. Secundário (m) | -0,669   | -0,681   | -0,692   | -0,702   | -0,712   | -0,721   | -0,730   | -0,738   | -0,746   | -0,753   | -0,760   | -0,767   |
| <b>03</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 13,54    | 13,53    | 13,52    | 13,52    | 13,51    | 13,50    | 13,49    | 13,49    | 13,48    | 13,48    | 13,47    | 13,47    |
| Coef. de comp. sec. | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   |
| Rec. Secundário (m) | -0,468   | -0,477   | -0,485   | -0,492   | -0,499   | -0,506   | -0,512   | -0,518   | -0,524   | -0,529   | -0,534   | -0,539   |
| <b>04</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 29,06    | 29,05    | 29,04    | 29,04    | 29,03    | 29,02    | 29,01    | 29,01    | 29,00    | 29,00    | 28,99    | 28,99    |
| Coef. de comp. sec. | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   |
| Rec. Secundário (m) | -0,477   | -0,485   | -0,494   | -0,501   | -0,509   | -0,515   | -0,522   | -0,528   | -0,534   | -0,539   | -0,545   | -0,550   |

| MS \ DIAS           | 30      | 60      | 90      | 120      | 150      | 180      | 210      | 240      | 270      | 300      | 330      | 360      |
|---------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>05</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 6,50    | 6,28    | 6,18    | 6,12     | 6,08     | 6,04     | 6,02     | 5,99     | 5,98     | 5,96     | 5,94     | 5,93     |
| Coef. de comp. sec. | -0,055  | -0,055  | -0,055  | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   |
| Rec. Secundário (m) | -0,217  | -0,321  | -0,382  | -0,424   | -0,457   | -0,483   | -0,505   | -0,525   | -0,541   | -0,557   | -0,570   | -0,583   |
| <b>06</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 18,46   | 18,14   | 17,98   | 17,89    | 17,82    | 17,77    | 17,73    | 17,69    | 17,66    | 17,64    | 17,61    | 17,59    |
| Coef. de comp. sec. | -0,029  | -0,029  | -0,029  | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   |
| Rec. Secundário (m) | -0,326  | -0,485  | -0,578  | -0,644   | -0,694   | -0,735   | -0,770   | -0,800   | -0,827   | -0,850   | -0,872   | -0,891   |
| <b>07</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 12,00   | 11,71   | 11,57   | 11,49    | 11,43    | 11,39    | 11,35    | 11,32    | 11,30    | 11,27    | 11,25    | 11,23    |
| Coef. de comp. sec. | -0,040  | -0,040  | -0,040  | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   |
| Rec. Secundário (m) | -0,288  | -0,428  | -0,510  | -0,567   | -0,611   | -0,647   | -0,677   | -0,703   | -0,726   | -0,747   | -0,766   | -0,782   |
| <b>08</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 12,64   | 12,34   | 12,19   | 12,11    | 12,05    | 12,00    | 11,96    | 11,93    | 11,90    | 11,88    | 11,86    | 11,84    |
| Coef. de comp. sec. | -0,040  | -0,040  | -0,040  | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   |
| Rec. Secundário (m) | -0,303  | -0,450  | -0,536  | -0,596   | -0,642   | -0,680   | -0,712   | -0,739   | -0,764   | -0,785   | -0,805   | -0,822   |

| MS \ DIAS           | 390      | 420      | 450      | 480      | 510      | 540      | 570      | 600      | 630      | 660      | 690      | 720      |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>05</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 5,92     | 5,91     | 5,90     | 5,89     | 5,88     | 5,87     | 5,86     | 5,85     | 5,85     | 5,84     | 5,83     | 5,83     |
| Coef. de comp. sec. | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   | -0,055   |
| Rec. Secundário (m) | -0,594   | -0,605   | -0,614   | -0,623   | -0,632   | -0,640   | -0,648   | -0,655   | -0,662   | -0,668   | -0,675   | -0,680   |
| <b>06</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 17,57    | 17,56    | 17,54    | 17,52    | 17,51    | 17,50    | 17,48    | 17,47    | 17,46    | 17,45    | 17,44    | 17,43    |
| Coef. de comp. sec. | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   | -0,029   |
| Rec. Secundário (m) | -0,909   | -0,925   | -0,941   | -0,955   | -0,969   | -0,981   | -0,993   | -1,005   | -1,016   | -1,026   | -1,036   | -1,045   |
| <b>07</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 11,22    | 11,20    | 11,19    | 11,17    | 11,16    | 11,15    | 11,14    | 11,13    | 11,12    | 11,11    | 11,10    | 11,09    |
| Coef. de comp. sec. | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   |
| Rec. Secundário (m) | -0,798   | -0,812   | -0,826   | -0,838   | -0,850   | -0,861   | -0,871   | -0,881   | -0,891   | -0,900   | -0,908   | -0,916   |
| <b>08</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 11,82    | 11,80    | 11,79    | 11,78    | 11,76    | 11,75    | 11,74    | 11,73    | 11,72    | 11,71    | 11,70    | 11,69    |
| Coef. de comp. sec. | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   | -0,040   |
| Rec. Secundário (m) | -0,839   | -0,854   | -0,868   | -0,881   | -0,893   | -0,905   | -0,916   | -0,926   | -0,936   | -0,946   | -0,955   | -0,963   |



| MS \ DIAS           | 30      | 60      | 90      | 120      | 150      | 180      | 210      | 240      | 270      | 300      | 330      | 360      |
|---------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>09</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 25,77   | 24,98   | 24,60   | 24,38    | 24,22    | 24,11    | 24,01    | 23,93    | 23,86    | 23,79    | 23,74    | 23,69    |
| Coef. de comp. sec. | -0,051  | -0,051  | -0,051  | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   |
| Rec. Secundário (m) | -0,788  | -1,171  | -1,391  | -1,546   | -1,665   | -1,762   | -1,844   | -1,914   | -1,976   | -2,031   | -2,081   | -2,127   |
| <b>10</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 13,65   | 13,43   | 13,32   | 13,25    | 13,21    | 13,18    | 13,15    | 13,12    | 13,10    | 13,08    | 13,07    | 13,05    |
| Coef. de comp. sec. | -0,027  | -0,027  | -0,027  | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   |
| Rec. Secundário (m) | -0,222  | -0,331  | -0,395  | -0,439   | -0,474   | -0,502   | -0,526   | -0,546   | -0,565   | -0,581   | -0,595   | -0,609   |
| <b>11</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 9,84    | 9,68    | 9,61    | 9,56     | 9,53     | 9,51     | 9,49     | 9,47     | 9,45     | 9,44     | 9,43     | 9,42     |
| Coef. de comp. sec. | -0,027  | -0,027  | -0,027  | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   |
| Rec. Secundário (m) | -0,157  | -0,235  | -0,279  | -0,311   | -0,336   | -0,356   | -0,372   | -0,387   | -0,400   | -0,411   | -0,422   | -0,431   |
| <b>12</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 20,00   | 19,89   | 19,84   | 19,80    | 19,78    | 19,76    | 19,75    | 19,74    | 19,73    | 19,72    | 19,71    | 19,70    |
| Coef. de comp. sec. | -0,009  | -0,009  | -0,009  | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   |
| Rec. Secundário (m) | -0,110  | -0,165  | -0,196  | -0,219   | -0,237   | -0,251   | -0,263   | -0,273   | -0,283   | -0,291   | -0,298   | -0,305   |

| MS \ DIAS           | 390      | 420      | 450      | 480      | 510      | 540      | 570      | 600      | 630      | 660      | 690      | 720      |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>09</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 23,64    | 23,60    | 23,56    | 23,53    | 23,49    | 23,46    | 23,43    | 23,40    | 23,38    | 23,35    | 23,33    | 23,31    |
| Coef. de comp. sec. | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   | -0,051   |
| Rec. Secundário (m) | -2,169   | -2,207   | -2,243   | -2,277   | -2,308   | -2,338   | -2,366   | -2,392   | -2,417   | -2,441   | -2,464   | -2,486   |
| <b>10</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 13,04    | 13,03    | 13,02    | 13,01    | 13,00    | 12,99    | 12,98    | 12,97    | 12,96    | 12,95    | 12,95    | 12,94    |
| Coef. de comp. sec. | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   |
| Rec. Secundário (m) | -0,621   | -0,632   | -0,643   | -0,653   | -0,662   | -0,671   | -0,679   | -0,687   | -0,694   | -0,701   | -0,708   | -0,714   |
| <b>11</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 9,41     | 9,40     | 9,39     | 9,39     | 9,38     | 9,37     | 9,37     | 9,36     | 9,36     | 9,35     | 9,35     | 9,34     |
| Coef. de comp. sec. | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   | -0,027   |
| Rec. Secundário (m) | -0,440   | -0,448   | -0,455   | -0,462   | -0,469   | -0,475   | -0,481   | -0,486   | -0,492   | -0,497   | -0,501   | -0,506   |
| <b>12</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 19,69    | 19,69    | 19,68    | 19,68    | 19,67    | 19,67    | 19,66    | 19,66    | 19,66    | 19,65    | 19,65    | 19,64    |
| Coef. de comp. sec. | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   | -0,009   |
| Rec. Secundário (m) | -0,311   | -0,317   | -0,323   | -0,328   | -0,332   | -0,337   | -0,341   | -0,345   | -0,349   | -0,352   | -0,356   | -0,359   |

| MS \ DIAS           | 30      | 60      | 90      | 120      | 150      | 180      | 210      | 240      | 270      | 300      | 330      | 360      |
|---------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>13</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 12,00   | 11,84   | 11,76   | 11,71    | 11,68    | 11,65    | 11,63    | 11,62    | 11,60    | 11,59    | 11,58    | 11,57    |
| Coef. de comp. sec. | -0,022  | -0,022  | -0,022  | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   |
| Rec. Secundário (m) | -0,162  | -0,241  | -0,287  | -0,320   | -0,345   | -0,366   | -0,384   | -0,399   | -0,412   | -0,424   | -0,434   | -0,444   |
| <b>14</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 10,80   | 10,66   | 10,59   | 10,55    | 10,52    | 10,49    | 10,48    | 10,46    | 10,45    | 10,43    | 10,42    | 10,41    |
| Coef. de comp. sec. | -0,022  | -0,022  | -0,022  | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   |
| Rec. Secundário (m) | -0,143  | -0,214  | -0,255  | -0,284   | -0,306   | -0,325   | -0,340   | -0,354   | -0,365   | -0,376   | -0,385   | -0,394   |
| <b>15</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 17,50   | 17,18   | 17,03   | 16,93    | 16,87    | 16,82    | 16,78    | 16,75    | 16,72    | 16,69    | 16,67    | 16,65    |
| Coef. de comp. sec. | -0,030  | -0,030  | -0,030  | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   |
| Rec. Secundário (m) | -0,318  | -0,475  | -0,565  | -0,629   | -0,679   | -0,719   | -0,753   | -0,782   | -0,808   | -0,831   | -0,852   | -0,871   |
| <b>16</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 25,30   | 25,01   | 24,86   | 24,78    | 24,72    | 24,67    | 24,63    | 24,60    | 24,58    | 24,55    | 24,53    | 24,51    |
| Coef. de comp. sec. | -0,019  | -0,019  | -0,019  | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   |
| Rec. Secundário (m) | -0,293  | -0,438  | -0,522  | -0,581   | -0,627   | -0,665   | -0,697   | -0,724   | -0,748   | -0,770   | -0,790   | -0,807   |

| MS \ DIAS           | 390      | 420      | 450      | 480      | 510      | 540      | 570      | 600      | 630      | 660      | 690      | 720      |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>13</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 11,56    | 11,55    | 11,54    | 11,53    | 11,52    | 11,52    | 11,51    | 11,50    | 11,50    | 11,49    | 11,49    | 11,48    |
| Coef. de comp. sec. | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   |
| Rec. Secundário (m) | -0,453   | -0,461   | -0,469   | -0,476   | -0,483   | -0,490   | -0,496   | -0,501   | -0,507   | -0,512   | -0,517   | -0,522   |
| <b>14</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 10,41    | 10,40    | 10,39    | 10,38    | 10,38    | 10,37    | 10,37    | 10,36    | 10,36    | 10,35    | 10,35    | 10,34    |
| Coef. de comp. sec. | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   | -0,022   |
| Rec. Secundário (m) | -0,402   | -0,409   | -0,416   | -0,423   | -0,429   | -0,434   | -0,440   | -0,445   | -0,450   | -0,454   | -0,459   | -0,463   |
| <b>15</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 16,63    | 16,61    | 16,60    | 16,58    | 16,57    | 16,55    | 16,54    | 16,53    | 16,52    | 16,51    | 16,50    | 16,49    |
| Coef. de comp. sec. | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   |
| Rec. Secundário (m) | -0,888   | -0,904   | -0,920   | -0,934   | -0,947   | -0,959   | -0,971   | -0,982   | -0,993   | -1,003   | -1,012   | -1,021   |
| <b>16</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 24,49    | 24,48    | 24,46    | 24,45    | 24,43    | 24,42    | 24,41    | 24,40    | 24,39    | 24,38    | 24,37    | 24,36    |
| Coef. de comp. sec. | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   | -0,019   |
| Rec. Secundário (m) | -0,824   | -0,839   | -0,853   | -0,866   | -0,879   | -0,890   | -0,901   | -0,912   | -0,922   | -0,931   | -0,940   | -0,949   |

| MS \ DIAS           | 30      | 60      | 90      | 120      | 150      | 180      | 210      | 240      | 270      | 300      | 330      | 360      |
|---------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>17</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 35,620  | 35,308  | 35,154  | 35,064   | 35,000   | 34,951   | 34,911   | 34,877   | 34,848   | 34,822   | 34,799   | 34,778   |
| Coef. de comp. sec. | -0,015  | -0,015  | -0,015  | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   |
| Rec. Secundário (m) | -0,312  | -0,466  | -0,556  | -0,620   | -0,669   | -0,709   | -0,743   | -0,772   | -0,798   | -0,821   | -0,842   | -0,861   |
| <b>18</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 17,95   | 17,47   | 17,24   | 17,11    | 17,01    | 16,94    | 16,88    | 16,83    | 16,79    | 16,75    | 16,72    | 16,69    |
| Coef. de comp. sec. | -0,044  | -0,044  | -0,044  | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   |
| Rec. Secundário (m) | -0,477  | -0,709  | -0,843  | -0,937   | -1,010   | -1,069   | -1,119   | -1,162   | -1,200   | -1,234   | -1,265   | -1,293   |
| <b>19</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 16,14   | 15,67   | 15,44   | 15,31    | 15,22    | 15,15    | 15,09    | 15,04    | 15,00    | 14,96    | 14,93    | 14,90    |
| Coef. de comp. sec. | -0,048  | -0,048  | -0,048  | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   |
| Rec. Secundário (m) | -0,468  | -0,696  | -0,827  | -0,919   | -0,990   | -1,048   | -1,097   | -1,139   | -1,176   | -1,209   | -1,239   | -1,266   |
| <b>20</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 9,25    | 8,74    | 8,50    | 8,36     | 8,27     | 8,19     | 8,13     | 8,08     | 8,04     | 8,00     | 7,97     | 7,94     |
| Coef. de comp. sec. | -0,092  | -0,092  | -0,092  | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   |
| Rec. Secundário (m) | -0,510  | -0,750  | -0,887  | -0,983   | -1,056   | -1,116   | -1,165   | -1,208   | -1,246   | -1,279   | -1,310   | -1,337   |

| MS \ DIAS           | 390      | 420      | 450      | 480      | 510      | 540      | 570      | 600      | 630      | 660      | 690      | 720      |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>17</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 34,759   | 34,741   | 34,725   | 34,710   | 34,696   | 34,682   | 34,670   | 34,658   | 34,647   | 34,636   | 34,626   | 34,616   |
| Coef. de comp. sec. | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   | -0,015   |
| Rec. Secundário (m) | -0,879   | -0,895   | -0,910   | -0,924   | -0,938   | -0,950   | -0,962   | -0,973   | -0,984   | -0,994   | -1,004   | -1,013   |
| <b>18</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 16,66    | 16,63    | 16,61    | 16,59    | 16,57    | 16,55    | 16,53    | 16,51    | 16,50    | 16,48    | 16,46    | 16,45    |
| Coef. de comp. sec. | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   | -0,044   |
| Rec. Secundário (m) | -1,318   | -1,342   | -1,364   | -1,384   | -1,403   | -1,422   | -1,439   | -1,455   | -1,470   | -1,485   | -1,499   | -1,513   |
| <b>19</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 14,87    | 14,85    | 14,83    | 14,80    | 14,78    | 14,77    | 14,75    | 14,73    | 14,72    | 14,70    | 14,69    | 14,67    |
| Coef. de comp. sec. | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   | -0,048   |
| Rec. Secundário (m) | -1,291   | -1,314   | -1,335   | -1,355   | -1,374   | -1,392   | -1,408   | -1,424   | -1,439   | -1,453   | -1,467   | -1,480   |
| <b>20</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 7,91     | 7,89     | 7,86     | 7,84     | 7,82     | 7,80     | 7,79     | 7,77     | 7,75     | 7,74     | 7,72     | 7,71     |
| Coef. de comp. sec. | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   | -0,092   |
| Rec. Secundário (m) | -1,362   | -1,385   | -1,407   | -1,427   | -1,446   | -1,464   | -1,480   | -1,496   | -1,511   | -1,526   | -1,539   | -1,552   |

| MS \ DIAS           | 30      | 60      | 90      | 120      | 150      | 180      | 210      | 240      | 270      | 300      | 330      | 360      |
|---------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>21</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 20,00   | 19,64   | 19,46   | 19,36    | 19,29    | 19,23    | 19,19    | 19,15    | 19,12    | 19,09    | 19,06    | 19,04    |
| Coef. de comp. sec. | -0,030  | -0,030  | -0,030  | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   |
| Rec. Secundário (m) | -0,359  | -0,536  | -0,638  | -0,710   | -0,766   | -0,811   | -0,849   | -0,883   | -0,912   | -0,938   | -0,961   | -0,983   |
| <b>22</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 6,80    | 6,30    | 6,07    | 5,94     | 5,85     | 5,78     | 5,72     | 5,67     | 5,63     | 5,60     | 5,57     | 5,54     |
| Coef. de comp. sec. | -0,122  | -0,122  | -0,122  | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   |
| Rec. Secundário (m) | -0,501  | -0,733  | -0,863  | -0,954   | -1,023   | -1,079   | -1,126   | -1,166   | -1,201   | -1,233   | -1,261   | -1,286   |
| <b>23</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 35,39   | 34,66   | 34,30   | 34,10    | 33,95    | 33,84    | 33,75    | 33,67    | 33,60    | 33,54    | 33,49    | 33,44    |
| Coef. de comp. sec. | -0,034  | -0,034  | -0,034  | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   |
| Rec. Secundário (m) | -0,728  | -1,085  | -1,291  | -1,437   | -1,549   | -1,641   | -1,718   | -1,784   | -1,843   | -1,896   | -1,943   | -1,986   |
| <b>24</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 17,50   | 16,67   | 16,28   | 16,05    | 15,90    | 15,78    | 15,68    | 15,60    | 15,53    | 15,46    | 15,41    | 15,36    |
| Coef. de comp. sec. | -0,078  | -0,078  | -0,078  | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   |
| Rec. Secundário (m) | -0,827  | -1,220  | -1,445  | -1,602   | -1,723   | -1,821   | -1,904   | -1,975   | -2,037   | -2,092   | -2,142   | -2,188   |

| MS \ DIAS           | 390      | 420      | 450      | 480      | 510      | 540      | 570      | 600      | 630      | 660      | 690      | 720      |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>21</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 19,02    | 19,00    | 18,98    | 18,96    | 18,95    | 18,93    | 18,92    | 18,90    | 18,89    | 18,88    | 18,87    | 18,86    |
| Coef. de comp. sec. | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   | -0,030   |
| Rec. Secundário (m) | -1,003   | -1,021   | -1,038   | -1,054   | -1,068   | -1,082   | -1,096   | -1,108   | -1,120   | -1,132   | -1,142   | -1,153   |
| <b>22</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 5,51     | 5,49     | 5,47     | 5,45     | 5,43     | 5,41     | 5,40     | 5,38     | 5,37     | 5,35     | 5,34     | 5,33     |
| Coef. de comp. sec. | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   | -0,122   |
| Rec. Secundário (m) | -1,310   | -1,332   | -1,352   | -1,370   | -1,388   | -1,404   | -1,420   | -1,434   | -1,448   | -1,461   | -1,474   | -1,486   |
| <b>23</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 33,40    | 33,36    | 33,32    | 33,29    | 33,26    | 33,23    | 33,20    | 33,17    | 33,15    | 33,12    | 33,10    | 33,08    |
| Coef. de comp. sec. | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   |
| Rec. Secundário (m) | -2,026   | -2,063   | -2,097   | -2,129   | -2,158   | -2,187   | -2,213   | -2,239   | -2,263   | -2,285   | -2,307   | -2,328   |
| <b>24</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 15,31    | 15,27    | 15,23    | 15,20    | 15,16    | 15,13    | 15,10    | 15,07    | 15,05    | 15,02    | 15,00    | 14,98    |
| Coef. de comp. sec. | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   | -0,078   |
| Rec. Secundário (m) | -2,230   | -2,268   | -2,304   | -2,337   | -2,369   | -2,398   | -2,426   | -2,452   | -2,477   | -2,501   | -2,524   | -2,546   |



| MS \ DIAS           | 30      | 60      | 90      | 120      | 150      | 180      | 210      | 240      | 270      | 300      | 330      | 360      |
|---------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>25</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 22,50   | 22,04   | 21,81   | 21,68    | 21,59    | 21,52    | 21,46    | 21,41    | 21,37    | 21,33    | 21,30    | 21,27    |
| Coef. de comp. sec. | -0,034  | -0,034  | -0,034  | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   |
| Rec. Secundário (m) | -0,462  | -0,688  | -0,819  | -0,912   | -0,983   | -1,041   | -1,090   | -1,132   | -1,170   | -1,203   | -1,233   | -1,260   |
| <b>26</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 17,00   | 16,68   | 16,53   | 16,44    | 16,38    | 16,33    | 16,29    | 16,25    | 16,22    | 16,20    | 16,18    | 16,16    |
| Coef. de comp. sec. | -0,031  | -0,031  | -0,031  | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   |
| Rec. Secundário (m) | -0,316  | -0,471  | -0,561  | -0,624   | -0,673   | -0,713   | -0,747   | -0,776   | -0,801   | -0,824   | -0,845   | -0,864   |
| <b>27</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 38,62   | 38,20   | 37,99   | 37,87    | 37,79    | 37,72    | 37,67    | 37,62    | 37,58    | 37,55    | 37,52    | 37,49    |
| Coef. de comp. sec. | -0,018  | -0,018  | -0,018  | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   |
| Rec. Secundário (m) | -0,420  | -0,628  | -0,749  | -0,834   | -0,900   | -0,954   | -1,000   | -1,039   | -1,074   | -1,105   | -1,133   | -1,159   |
| <b>28</b>           |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 43,70   | 43,26   | 43,04   | 42,91    | 42,82    | 42,75    | 42,69    | 42,65    | 42,61    | 42,57    | 42,54    | 42,51    |
| Coef. de comp. sec. | -0,017  | -0,017  | -0,017  | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   |
| Rec. Secundário (m) | -0,442  | -0,661  | -0,789  | -0,879   | -0,948   | -1,005   | -1,053   | -1,095   | -1,132   | -1,164   | -1,194   | -1,221   |

| MS \ DIAS           | 390      | 420      | 450      | 480      | 510      | 540      | 570      | 600      | 630      | 660      | 690      | 720      |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>25</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 21,24    | 21,21    | 21,19    | 21,17    | 21,15    | 21,13    | 21,11    | 21,10    | 21,08    | 21,06    | 21,05    | 21,04    |
| Coef. de comp. sec. | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   | -0,034   |
| Rec. Secundário (m) | -1,286   | -1,309   | -1,330   | -1,351   | -1,370   | -1,388   | -1,404   | -1,421   | -1,436   | -1,450   | -1,464   | -1,477   |
| <b>26</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 16,14    | 16,12    | 16,10    | 16,09    | 16,07    | 16,06    | 16,05    | 16,04    | 16,03    | 16,02    | 16,01    | 16,00    |
| Coef. de comp. sec. | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   | -0,031   |
| Rec. Secundário (m) | -0,881   | -0,897   | -0,912   | -0,926   | -0,939   | -0,951   | -0,963   | -0,974   | -0,984   | -0,994   | -1,004   | -1,013   |
| <b>27</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 37,46    | 37,44    | 37,42    | 37,40    | 37,38    | 37,36    | 37,34    | 37,33    | 37,31    | 37,30    | 37,28    | 37,27    |
| Coef. de comp. sec. | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   | -0,018   |
| Rec. Secundário (m) | -1,182   | -1,204   | -1,224   | -1,243   | -1,261   | -1,278   | -1,293   | -1,309   | -1,323   | -1,336   | -1,349   | -1,362   |
| <b>28</b>           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 42,48    | 42,45    | 42,43    | 42,41    | 42,39    | 42,37    | 42,35    | 42,34    | 42,32    | 42,31    | 42,29    | 42,28    |
| Coef. de comp. sec. | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   | -0,017   |
| Rec. Secundário (m) | -1,246   | -1,269   | -1,290   | -1,310   | -1,329   | -1,347   | -1,363   | -1,379   | -1,394   | -1,409   | -1,422   | -1,435   |

| MS \ DIAS           | 30      | 60      | 90      | 120      | 150      | 180      | 210      | 240      | 270      | 300      | 330      | 360      |
|---------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 29                  |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 35,92   | 35,83   | 35,78   | 35,76    | 35,74    | 35,73    | 35,71    | 35,70    | 35,70    | 35,69    | 35,68    | 35,68    |
| Coef. de comp. sec. | -0,004  | -0,004  | -0,004  | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   |
| Rec. Secundário (m) | -0,088  | -0,133  | -0,158  | -0,177   | -0,191   | -0,202   | -0,212   | -0,221   | -0,228   | -0,235   | -0,241   | -0,246   |
| 30                  |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 1,00    | 2,00    | 3,00    | 4,00     | 5,00     | 6,00     | 7,00     | 8,00     | 9,00     | 10,00    | 11,00    | 12,00    |
| Tempo (s)           | 2592000 | 5184000 | 7776000 | 10368000 | 12960000 | 15552000 | 18144000 | 20736000 | 23328000 | 25920000 | 28512000 | 31104000 |
| H (m)               | 12,20   | 12,06   | 11,98   | 11,94    | 11,91    | 11,89    | 11,87    | 11,86    | 11,84    | 11,83    | 11,82    | 11,81    |
| Coef. de comp. sec. | -0,020  | -0,020  | -0,020  | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   |
| Rec. Secundário (m) | -0,145  | -0,216  | -0,258  | -0,287   | -0,310   | -0,328   | -0,344   | -0,358   | -0,370   | -0,380   | -0,390   | -0,399   |

| MS \ DIAS           | 390      | 420      | 450      | 480      | 510      | 540      | 570      | 600      | 630      | 660      | 690      | 720      |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 29                  |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 35,67    | 35,66    | 35,66    | 35,66    | 35,65    | 35,65    | 35,64    | 35,64    | 35,64    | 35,63    | 35,63    | 35,63    |
| Coef. de comp. sec. | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   | -0,004   |
| Rec. Secundário (m) | -0,251   | -0,256   | -0,260   | -0,265   | -0,268   | -0,272   | -0,275   | -0,279   | -0,282   | -0,285   | -0,288   | -0,290   |
| 30                  |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Tempo (meses)       | 13,00    | 14,00    | 15,00    | 16,00    | 17,00    | 18,00    | 19,00    | 20,00    | 21,00    | 22,00    | 23,00    | 24,00    |
| Tempo (s)           | 33696000 | 36288000 | 38880000 | 41472000 | 44064000 | 46656000 | 49248000 | 51840000 | 54432000 | 57024000 | 59616000 | 62208000 |
| H (m)               | 11,80    | 11,79    | 11,79    | 11,78    | 11,77    | 11,77    | 11,76    | 11,76    | 11,75    | 11,75    | 11,74    | 11,74    |
| Coef. de comp. sec. | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   | -0,020   |
| Rec. Secundário (m) | -0,407   | -0,414   | -0,421   | -0,428   | -0,434   | -0,439   | -0,445   | -0,450   | -0,455   | -0,460   | -0,464   | -0,468   |

## APÊNDICE II – PLANILHA RESUMO DE RECALQUES OBTIDOS PELO MODELO DE SOWERS (1973)

| DIAS<br>MS | 0    | 30    | 60    | 90    | 120   | 150   | 180   | 210   | 240   | 270   | 300   | 330   | 360   | 390   | 420   | 450   | 480   | 510   | 540   | 570   | 600   | 630   | 660   | 690   | 720   |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 01 - Sow   | 0,00 | -0,15 | -0,23 | -0,27 | -0,30 | -0,33 | -0,35 | -0,36 | -0,38 | -0,39 | -0,40 | -0,41 | -0,42 | -0,43 | -0,43 | -0,44 | -0,45 | -0,45 | -0,46 | -0,47 | -0,47 | -0,48 | -0,48 | -0,49 | -0,49 |
| 02 - Sow   | 0,00 | -0,24 | -0,36 | -0,43 | -0,48 | -0,51 | -0,54 | -0,57 | -0,59 | -0,61 | -0,63 | -0,64 | -0,66 | -0,67 | -0,68 | -0,69 | -0,70 | -0,71 | -0,72 | -0,73 | -0,74 | -0,75 | -0,75 | -0,76 | -0,77 |
| 03 - Sow   | 0,00 | -0,17 | -0,25 | -0,30 | -0,33 | -0,36 | -0,38 | -0,40 | -0,41 | -0,43 | -0,44 | -0,45 | -0,46 | -0,47 | -0,48 | -0,48 | -0,49 | -0,50 | -0,51 | -0,51 | -0,52 | -0,52 | -0,53 | -0,53 | -0,54 |
| 04 - Sow   | 0,00 | -0,17 | -0,25 | -0,30 | -0,34 | -0,36 | -0,38 | -0,40 | -0,42 | -0,43 | -0,45 | -0,46 | -0,47 | -0,48 | -0,49 | -0,49 | -0,50 | -0,51 | -0,52 | -0,52 | -0,53 | -0,53 | -0,54 | -0,54 | -0,55 |
| 05 - Sow   | 0,00 | -0,22 | -0,32 | -0,38 | -0,42 | -0,46 | -0,48 | -0,51 | -0,52 | -0,54 | -0,56 | -0,57 | -0,58 | -0,59 | -0,60 | -0,61 | -0,62 | -0,63 | -0,64 | -0,65 | -0,65 | -0,66 | -0,67 | -0,67 | -0,68 |
| 06 - Sow   | 0,00 | -0,33 | -0,49 | -0,58 | -0,64 | -0,69 | -0,74 | -0,77 | -0,80 | -0,83 | -0,85 | -0,87 | -0,89 | -0,91 | -0,93 | -0,94 | -0,96 | -0,97 | -0,98 | -0,99 | -1,00 | -1,02 | -1,03 | -1,04 | -1,05 |
| 07 - Sow   | 0,00 | -0,29 | -0,43 | -0,51 | -0,57 | -0,61 | -0,65 | -0,68 | -0,70 | -0,73 | -0,75 | -0,77 | -0,78 | -0,80 | -0,81 | -0,83 | -0,84 | -0,85 | -0,86 | -0,87 | -0,88 | -0,89 | -0,90 | -0,91 | -0,92 |
| 08 - Sow   | 0,00 | -0,30 | -0,45 | -0,54 | -0,60 | -0,64 | -0,68 | -0,71 | -0,74 | -0,76 | -0,79 | -0,80 | -0,82 | -0,84 | -0,85 | -0,87 | -0,88 | -0,89 | -0,90 | -0,92 | -0,93 | -0,94 | -0,95 | -0,95 | -0,96 |
| 09 - Sow   | 0,00 | -0,79 | -1,17 | -1,39 | -1,55 | -1,66 | -1,76 | -1,84 | -1,91 | -1,98 | -2,03 | -2,08 | -2,13 | -2,17 | -2,21 | -2,24 | -2,28 | -2,31 | -2,34 | -2,37 | -2,39 | -2,42 | -2,44 | -2,46 | -2,49 |
| 10 - Sow   | 0,00 | -0,22 | -0,33 | -0,39 | -0,44 | -0,47 | -0,50 | -0,53 | -0,55 | -0,56 | -0,58 | -0,60 | -0,61 | -0,62 | -0,63 | -0,64 | -0,65 | -0,66 | -0,67 | -0,68 | -0,69 | -0,69 | -0,70 | -0,71 | -0,71 |
| 11 - Sow   | 0,00 | -0,16 | -0,23 | -0,28 | -0,31 | -0,34 | -0,36 | -0,37 | -0,39 | -0,40 | -0,41 | -0,42 | -0,43 | -0,44 | -0,45 | -0,46 | -0,46 | -0,47 | -0,48 | -0,48 | -0,49 | -0,49 | -0,50 | -0,50 | -0,51 |
| 12 - Sow   | 0,00 | -0,11 | -0,16 | -0,20 | -0,22 | -0,24 | -0,25 | -0,26 | -0,27 | -0,28 | -0,29 | -0,30 | -0,31 | -0,31 | -0,32 | -0,32 | -0,33 | -0,33 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,35 | -0,35 | -0,36 | -0,36 |
| 13 - Sow   | 0,00 | -0,16 | -0,24 | -0,29 | -0,32 | -0,35 | -0,37 | -0,38 | -0,40 | -0,41 | -0,42 | -0,43 | -0,44 | -0,45 | -0,46 | -0,47 | -0,48 | -0,48 | -0,49 | -0,50 | -0,50 | -0,51 | -0,51 | -0,52 | -0,52 |
| 14 - Sow   | 0,00 | -0,14 | -0,21 | -0,25 | -0,28 | -0,31 | -0,32 | -0,34 | -0,35 | -0,37 | -0,38 | -0,39 | -0,39 | -0,40 | -0,41 | -0,42 | -0,42 | -0,43 | -0,43 | -0,44 | -0,44 | -0,45 | -0,45 | -0,46 | -0,46 |
| 15 - Sow   | 0,00 | -0,32 | -0,47 | -0,57 | -0,63 | -0,68 | -0,72 | -0,75 | -0,78 | -0,81 | -0,83 | -0,85 | -0,87 | -0,89 | -0,90 | -0,92 | -0,93 | -0,95 | -0,96 | -0,97 | -0,98 | -0,99 | -1,00 | -1,01 | -1,02 |
| 16 - Sow   | 0,00 | -0,29 | -0,44 | -0,52 | -0,58 | -0,63 | -0,67 | -0,70 | -0,72 | -0,75 | -0,77 | -0,79 | -0,81 | -0,82 | -0,84 | -0,85 | -0,87 | -0,88 | -0,89 | -0,90 | -0,91 | -0,92 | -0,93 | -0,94 | -0,95 |
| 17 - Sow   | 0,00 | -0,31 | -0,47 | -0,56 | -0,62 | -0,67 | -0,71 | -0,74 | -0,77 | -0,80 | -0,82 | -0,84 | -0,86 | -0,88 | -0,90 | -0,91 | -0,92 | -0,94 | -0,95 | -0,96 | -0,97 | -0,98 | -0,99 | -1,00 | -1,01 |
| 18 - Sow   | 0,00 | -0,48 | -0,71 | -0,84 | -0,94 | -1,01 | -1,07 | -1,12 | -1,16 | -1,20 | -1,23 | -1,26 | -1,29 | -1,32 | -1,34 | -1,36 | -1,38 | -1,40 | -1,42 | -1,44 | -1,45 | -1,47 | -1,49 | -1,50 | -1,51 |
| 19 - Sow   | 0,00 | -0,47 | -0,70 | -0,83 | -0,92 | -0,99 | -1,05 | -1,10 | -1,14 | -1,18 | -1,21 | -1,24 | -1,27 | -1,29 | -1,31 | -1,34 | -1,36 | -1,37 | -1,39 | -1,41 | -1,42 | -1,44 | -1,45 | -1,47 | -1,48 |
| 20 - Sow   | 0,00 | -0,51 | -0,75 | -0,89 | -0,98 | -1,06 | -1,12 | -1,17 | -1,21 | -1,25 | -1,28 | -1,31 | -1,34 | -1,36 | -1,39 | -1,41 | -1,43 | -1,45 | -1,46 | -1,48 | -1,50 | -1,51 | -1,53 | -1,54 | -1,55 |
| 21 - Sow   | 0,00 | -0,36 | -0,54 | -0,64 | -0,71 | -0,77 | -0,81 | -0,85 | -0,88 | -0,91 | -0,94 | -0,96 | -0,98 | -1,00 | -1,02 | -1,04 | -1,05 | -1,07 | -1,08 | -1,10 | -1,11 | -1,12 | -1,13 | -1,14 | -1,15 |
| 22 - Sow   | 0,00 | -0,50 | -0,73 | -0,86 | -0,95 | -1,02 | -1,08 | -1,13 | -1,17 | -1,20 | -1,23 | -1,26 | -1,29 | -1,31 | -1,33 | -1,35 | -1,37 | -1,39 | -1,40 | -1,42 | -1,43 | -1,45 | -1,46 | -1,47 | -1,49 |
| 23 - Sow   | 0,00 | -0,73 | -1,08 | -1,29 | -1,44 | -1,55 | -1,64 | -1,72 | -1,78 | -1,84 | -1,90 | -1,94 | -1,99 | -2,03 | -2,06 | -2,10 | -2,13 | -2,16 | -2,19 | -2,21 | -2,24 | -2,26 | -2,29 | -2,31 | -2,33 |
| 24 - Sow   | 0,00 | -0,83 | -1,22 | -1,45 | -1,60 | -1,72 | -1,82 | -1,90 | -1,97 | -2,04 | -2,09 | -2,14 | -2,19 | -2,23 | -2,27 | -2,30 | -2,34 | -2,37 | -2,40 | -2,43 | -2,45 | -2,48 | -2,50 | -2,52 | -2,55 |
| 25 - Sow   | 0,00 | -0,46 | -0,69 | -0,82 | -0,91 | -0,98 | -1,04 | -1,09 | -1,13 | -1,17 | -1,20 | -1,23 | -1,26 | -1,29 | -1,31 | -1,33 | -1,35 | -1,37 | -1,39 | -1,40 | -1,42 | -1,44 | -1,45 | -1,46 | -1,48 |
| 26 - Sow   | 0,00 | -0,32 | -0,47 | -0,56 | -0,62 | -0,67 | -0,71 | -0,75 | -0,78 | -0,80 | -0,82 | -0,84 | -0,86 | -0,88 | -0,90 | -0,91 | -0,93 | -0,94 | -0,95 | -0,96 | -0,97 | -0,98 | -0,99 | -1,00 | -1,01 |
| 27 - Sow   | 0,00 | -0,42 | -0,63 | -0,75 | -0,83 | -0,90 | -0,95 | -1,00 | -1,04 | -1,07 | -1,10 | -1,13 | -1,16 | -1,18 | -1,20 | -1,22 | -1,24 | -1,26 | -1,28 | -1,29 | -1,31 | -1,32 | -1,34 | -1,35 | -1,36 |
| 28 - Sow   | 0,00 | -0,44 | -0,66 | -0,79 | -0,88 | -0,95 | -1,01 | -1,05 | -1,09 | -1,13 | -1,16 | -1,19 | -1,22 | -1,25 | -1,27 | -1,29 | -1,31 | -1,33 | -1,35 | -1,36 | -1,38 | -1,39 | -1,41 | -1,42 | -1,44 |
| 29 - Sow   | 0,00 | -0,09 | -0,13 | -0,16 | -0,18 | -0,19 | -0,20 | -0,21 | -0,22 | -0,23 | -0,23 | -0,24 | -0,25 | -0,25 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,27 | -0,27 | -0,28 | -0,28 | -0,28 | -0,28 | -0,29 | -0,29 |
| 30 - Sow   | 0,00 | -0,14 | -0,22 | -0,26 | -0,29 | -0,31 | -0,33 | -0,34 | -0,36 | -0,37 | -0,38 | -0,39 | -0,40 | -0,41 | -0,41 | -0,42 | -0,43 | -0,43 | -0,44 | -0,44 | -0,45 | -0,45 | -0,46 | -0,46 | -0,47 |

### APÊNDICE III – PLANILHA RESUMO DE RECALQUES AFERIDOS NOS MS

| DIAS<br>MS | 0    | 30    | 60    | 90    | 120   | 150   | 180   | 210   | 240   | 270   | 300   | 330   | 360   | 390   | 420   | 450   | 480   | 510   | 540   | 570   | 600   | 630   | 660   | 690   | 720   |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 01         | 0,00 | -0,02 | -0,06 | -0,08 | -0,11 | -0,13 | -0,14 | -0,15 | -0,17 | -0,18 | -0,19 | -0,19 | -0,19 | -0,21 | -0,24 | -0,26 | -0,27 | -0,29 | -0,33 | -0,35 | -0,38 | -0,39 | -0,41 | -0,42 | -0,43 |
| 02         | 0,00 | -0,01 | -0,02 | -0,03 | -0,04 | -0,06 | -0,07 | -0,08 | -0,11 | -0,12 | -0,13 | -0,14 | -0,17 | -0,18 | -0,21 | -0,24 | -0,25 | -0,28 | -0,31 | -0,33 | -0,35 | -0,37 | -0,36 | -0,39 | -0,38 |
| 03         | 0,00 | -0,02 | -0,03 | -0,04 | -0,07 | -0,06 | -0,11 | -0,13 | -0,15 | -0,17 | -0,17 | -0,21 | -0,24 | -0,26 | -0,27 | -0,29 | -0,34 | -0,38 | -0,41 | -0,43 | -0,45 | -0,47 | -0,48 | -0,50 | -0,51 |
| 04         | 0,00 | -0,01 | -0,06 | -0,10 | -0,13 | -0,17 | -0,18 | -0,20 | -0,24 | -0,27 | -0,30 | -0,35 | -0,38 | -0,39 | -0,40 | -0,41 | -0,43 | -0,42 | -0,45 | -0,46 | -0,48 | -0,48 | -0,49 | -0,49 | -0,50 |
| 05         | 0,00 | -0,02 | -0,03 | -0,04 | -0,07 | -0,13 | -0,14 | -0,15 | -0,17 | -0,19 | -0,22 | -0,25 | -0,28 | -0,30 | -0,32 | -0,35 | -0,39 | -0,44 | -0,47 | -0,52 | -0,53 | -0,55 | -0,58 | -0,59 | -0,60 |
| 06         | 0,00 | -0,05 | -0,15 | -0,19 | -0,22 | -0,24 | -0,26 | -0,30 | -0,35 | -0,40 | -0,43 | -0,47 | -0,49 | -0,53 | -0,55 | -0,56 | -0,59 | -0,65 | -0,72 | -0,78 | -0,81 | -0,85 | -0,85 | -0,89 | -0,91 |
| 07         | 0,00 | -0,04 | -0,08 | -0,14 | -0,15 | -0,18 | -0,21 | -0,24 | -0,28 | -0,35 | -0,40 | -0,45 | -0,48 | -0,52 | -0,56 | -0,58 | -0,62 | -0,64 | -0,66 | -0,68 | -0,71 | -0,74 | -0,77 | -0,78 | -0,80 |
| 08         | 0,00 | -0,08 | -0,12 | -0,18 | -0,24 | -0,30 | -0,29 | -0,32 | -0,37 | -0,42 | -0,48 | -0,50 | -0,56 | -0,59 | -0,61 | -0,64 | -0,67 | -0,70 | -0,73 | -0,75 | -0,75 | -0,78 | -0,79 | -0,83 | -0,85 |
| 09         | 0,00 | -0,13 | -0,25 | -0,38 | -0,52 | -0,61 | -0,73 | -0,88 | -0,95 | -1,05 | -1,12 | -1,22 | -1,35 | -1,41 | -1,50 | -1,53 | -1,62 | -1,68 | -1,74 | -1,80 | -1,85 | -1,90 | -1,94 | -1,97 | -1,99 |
| 10         | 0,00 | -0,06 | -0,10 | -0,16 | -0,19 | -0,22 | -0,27 | -0,31 | -0,35 | -0,37 | -0,38 | -0,41 | -0,43 | -0,44 | -0,45 | -0,48 | -0,51 | -0,52 | -0,54 | -0,55 | -0,56 | -0,57 | -0,59 | -0,61 | -0,62 |
| 11         | 0,00 | -0,02 | -0,04 | -0,05 | -0,06 | -0,08 | -0,12 | -0,15 | -0,18 | -0,21 | -0,22 | -0,23 | -0,24 | -0,26 | -0,28 | -0,29 | -0,31 | -0,31 | -0,32 | -0,33 | -0,35 | -0,38 | -0,40 | -0,42 | -0,44 |
| 12         | 0,00 | -0,01 | -0,03 | -0,03 | -0,05 | -0,07 | -0,08 | -0,08 | -0,11 | -0,12 | -0,14 | -0,13 | -0,16 | -0,18 | -0,19 | -0,20 | -0,22 | -0,23 | -0,24 | -0,24 | -0,24 | -0,25 | -0,27 | -0,29 | -0,31 |
| 13         | 0,00 | -0,04 | -0,07 | -0,10 | -0,13 | -0,16 | -0,19 | -0,21 | -0,23 | -0,26 | -0,28 | -0,30 | -0,32 | -0,33 | -0,35 | -0,36 | -0,38 | -0,39 | -0,41 | -0,41 | -0,42 | -0,43 | -0,44 | -0,44 | -0,45 |
| 14         | 0,00 | -0,02 | -0,04 | -0,05 | -0,07 | -0,09 | -0,11 | -0,13 | -0,15 | -0,16 | -0,18 | -0,20 | -0,22 | -0,24 | -0,26 | -0,27 | -0,29 | -0,31 | -0,32 | -0,33 | -0,34 | -0,35 | -0,37 | -0,38 | -0,40 |
| 15         | 0,00 | -0,04 | -0,12 | -0,19 | -0,26 | -0,32 | -0,38 | -0,43 | -0,48 | -0,53 | -0,56 | -0,60 | -0,63 | -0,65 | -0,67 | -0,70 | -0,72 | -0,74 | -0,76 | -0,78 | -0,80 | -0,82 | -0,84 | -0,87 | -0,89 |
| 16         | 0,00 | -0,05 | -0,10 | -0,15 | -0,20 | -0,23 | -0,24 | -0,25 | -0,31 | -0,34 | -0,37 | -0,45 | -0,52 | -0,55 | -0,60 | -0,67 | -0,67 | -0,71 | -0,73 | -0,75 | -0,77 | -0,79 | -0,80 | -0,81 | -0,82 |
| 17         | 0,00 | -0,11 | -0,15 | -0,18 | -0,22 | -0,25 | -0,29 | -0,32 | -0,36 | -0,38 | -0,42 | -0,47 | -0,49 | -0,52 | -0,56 | -0,60 | -0,62 | -0,67 | -0,69 | -0,73 | -0,76 | -0,79 | -0,81 | -0,84 | -0,87 |
| 18         | 0,00 | -0,15 | -0,20 | -0,25 | -0,31 | -0,36 | -0,41 | -0,46 | -0,51 | -0,56 | -0,61 | -0,67 | -0,72 | -0,77 | -0,82 | -0,87 | -0,92 | -0,97 | -1,02 | -1,08 | -1,13 | -1,18 | -1,23 | -1,28 | -1,33 |
| 19         | 0,00 | -0,15 | -0,21 | -0,26 | -0,32 | -0,37 | -0,43 | -0,48 | -0,54 | -0,59 | -0,65 | -0,71 | -0,76 | -0,82 | -0,87 | -0,93 | -0,98 | -1,04 | -1,08 | -1,11 | -1,15 | -1,19 | -1,23 | -1,27 | -1,31 |
| 20         | 0,00 | -0,06 | -0,12 | -0,18 | -0,24 | -0,30 | -0,36 | -0,42 | -0,47 | -0,53 | -0,59 | -0,65 | -0,71 | -0,77 | -0,83 | -0,89 | -0,95 | -1,01 | -1,07 | -1,13 | -1,19 | -1,25 | -1,30 | -1,36 | -1,42 |
| 21         | 0,00 | -0,03 | -0,21 | -0,31 | -0,40 | -0,48 | -0,51 | -0,54 | -0,56 | -0,59 | -0,61 | -0,64 | -0,67 | -0,69 | -0,72 | -0,75 | -0,77 | -0,81 | -0,82 | -0,83 | -0,88 | -0,90 | -0,93 | -0,97 | -1,00 |
| 22         | 0,00 | -0,14 | -0,32 | -0,52 | -0,58 | -0,74 | -0,86 | -0,94 | -1,02 | -1,06 | -1,10 | -1,15 | -1,20 | -1,22 | -1,24 | -1,26 | -1,27 | -1,29 | -1,31 | -1,34 | -1,35 | -1,37 | -1,38 | -1,39 | -1,40 |
| 23         | 0,00 | -0,28 | -0,45 | -0,63 | -0,75 | -0,87 | -0,93 | -0,99 | -1,12 | -1,27 | -1,32 | -1,42 | -1,43 | -1,53 | -1,56 | -1,60 | -1,61 | -1,65 | -1,76 | -1,78 | -1,81 | -1,88 | -1,91 | -1,95 | -1,97 |
| 24         | 0,00 | -0,26 | -0,53 | -0,84 | -1,13 | -1,28 | -1,49 | -1,56 | -1,62 | -1,70 | -1,78 | -1,89 | -1,98 | -2,04 | -2,04 | -2,08 | -2,10 | -2,16 | -2,22 | -2,20 | -2,22 | -2,23 | -2,26 | -2,28 | -2,28 |
| 25         | 0,00 | -0,17 | -0,32 | -0,39 | -0,47 | -0,56 | -0,60 | -0,67 | -0,75 | -0,82 | -0,86 | -0,90 | -0,95 | -0,96 | -1,03 | -1,07 | -1,10 | -1,11 | -1,13 | -1,17 | -1,20 | -1,22 | -1,24 | -1,25 | -1,27 |
| 26         | 0,00 | -0,01 | -0,07 | -0,12 | -0,16 | -0,23 | -0,21 | -0,30 | -0,35 | -0,42 | -0,43 | -0,46 | -0,48 | -0,54 | -0,56 | -0,61 | -0,66 | -0,73 | -0,76 | -0,78 | -0,80 | -0,82 | -0,84 | -0,86 | -0,88 |
| 27         | 0,00 | -0,10 | -0,25 | -0,40 | -0,51 | -0,55 | -0,60 | -0,65 | -0,65 | -0,71 | -0,77 | -0,80 | -0,81 | -0,83 | -0,86 | -0,89 | -0,92 | -0,96 | -0,99 | -1,02 | -1,04 | -1,09 | -1,13 | -1,14 | -1,17 |
| 28         | 0,00 | -0,13 | -0,20 | -0,31 | -0,43 | -0,49 | -0,59 | -0,65 | -0,70 | -0,73 | -0,77 | -0,82 | -0,86 | -0,92 | -0,99 | -1,02 | -1,07 | -1,11 | -1,12 | -1,15 | -1,17 | -1,19 | -1,21 | -1,22 | -1,24 |
| 29         | 0,00 | -0,07 | -0,12 | -0,17 | -0,19 | -0,20 | -0,22 | -0,25 | -0,27 | -0,28 | -0,30 | -0,32 | -0,33 | -0,36 | -0,43 | -0,45 | -0,47 | -0,48 | -0,52 | -0,57 | -0,59 | -0,64 | -0,65 | -0,71 | -0,73 |
| 30         | 0,00 | -0,03 | -0,07 | -0,11 | -0,14 | -0,16 | -0,17 | -0,19 | -0,21 | -0,24 | -0,26 | -0,27 | -0,28 | -0,29 | -0,30 | -0,31 | -0,32 | -0,33 | -0,33 | -0,35 | -0,36 | -0,36 | -0,38 | -0,39 | -0,40 |

# APÊNDICE IV – PLANILHAS DE DIST. NORMAL ASSOCIADA AO MOD. DE SOWERS (1973)

- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: TODOS OS SETORES - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 1                | 0,42         | 0,19       |
| 2                | 0,66         | 0,17       |
| 3                | 0,46         | 0,24       |
| 4                | 0,47         | 0,38       |
| 5                | 0,58         | 0,28       |
| 6                | 0,89         | 0,49       |
| 7                | 0,78         | 0,48       |
| 8                | 0,82         | 0,56       |
| 9                | 2,13         | 1,35       |
| 10               | 0,61         | 0,43       |
| 11               | 0,43         | 0,24       |
| 12               | 0,31         | 0,16       |
| 13               | 0,44         | 0,32       |
| 14               | 0,39         | 0,22       |
| 15               | 0,87         | 0,63       |
| 16               | 0,81         | 0,52       |
| 17               | 0,86         | 0,49       |
| 18               | 1,29         | 0,72       |
| 19               | 1,27         | 0,76       |
| 20               | 1,34         | 0,71       |
| 21               | 0,98         | 0,67       |
| 22               | 1,29         | 1,20       |
| 23               | 1,99         | 1,43       |
| 24               | 2,19         | 1,98       |
| 25               | 1,26         | 0,95       |
| 26               | 0,86         | 0,48       |
| 27               | 1,16         | 0,81       |
| 28               | 1,22         | 0,86       |
| 29               | 0,25         | 0,33       |
| 30               | 0,40         | 0,28       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 0,91         | 0,61       | 0,73             |
| Desvio padrão          | 0,52         | 0,43       | 0,33             |
| Variância              | 0,27         | 0,18       | 0,11             |
| Média +2DP             | 1,96         | 1,46       |                  |
| Média -2DP             | -0,13        | -0,24      |                  |

|                |       |                |      |
|----------------|-------|----------------|------|
| Início eixo xx | -0,24 | Fim do eixo xx | 1,96 |
| Pontos         | 30,00 | Incremento (m) | 0,08 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| -0,24          | 0,07         | 0,13       | 0,02             |
| -0,16          | 0,09         | 0,18       | 0,03             |
| -0,09          | 0,12         | 0,24       | 0,05             |
| -0,01          | 0,16         | 0,32       | 0,09             |
| 0,06           | 0,20         | 0,41       | 0,15             |
| 0,14           | 0,25         | 0,51       | 0,24             |
| 0,21           | 0,31         | 0,61       | 0,35             |
| 0,29           | 0,37         | 0,71       | 0,49             |
| 0,37           | 0,44         | 0,79       | 0,65             |
| 0,44           | 0,51         | 0,87       | 0,82             |
| 0,52           | 0,57         | 0,92       | 0,98             |
| 0,59           | 0,63         | 0,94       | 1,11             |
| 0,67           | 0,69         | 0,93       | 1,19             |
| 0,74           | 0,73         | 0,89       | 1,21             |
| 0,82           | 0,75         | 0,83       | 1,17             |
| 0,90           | 0,76         | 0,75       | 1,07             |
| 0,97           | 0,76         | 0,65       | 0,93             |
| 1,05           | 0,74         | 0,55       | 0,77             |
| 1,12           | 0,71         | 0,45       | 0,60             |
| 1,20           | 0,66         | 0,36       | 0,44             |
| 1,27           | 0,60         | 0,28       | 0,31             |
| 1,35           | 0,54         | 0,21       | 0,21             |
| 1,43           | 0,47         | 0,15       | 0,13             |
| 1,50           | 0,41         | 0,10       | 0,08             |
| 1,58           | 0,34         | 0,07       | 0,04             |
| 1,65           | 0,28         | 0,05       | 0,02             |
| 1,73           | 0,23         | 0,03       | 0,01             |
| 1,80           | 0,18         | 0,02       | 0,01             |
| 1,88           | 0,14         | 0,01       | 0,00             |
| 1,96           | 0,10         | 0,01       | 0,00             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| -0,45                  |

- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: TODOS OS SETORES - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 1                | 0,49         | 0,43       |
| 2                | 0,77         | 0,38       |
| 3                | 0,54         | 0,51       |
| 4                | 0,55         | 0,50       |
| 5                | 0,68         | 0,60       |
| 6                | 1,05         | 0,91       |
| 7                | 0,92         | 0,80       |
| 8                | 0,96         | 0,85       |
| 9                | 2,49         | 1,99       |
| 10               | 0,71         | 0,62       |
| 11               | 0,51         | 0,44       |
| 12               | 0,36         | 0,31       |
| 13               | 0,52         | 0,45       |
| 14               | 0,46         | 0,40       |
| 15               | 1,02         | 0,89       |
| 16               | 0,95         | 0,82       |
| 17               | 1,01         | 0,87       |
| 18               | 1,51         | 1,33       |
| 19               | 1,48         | 1,31       |
| 20               | 1,55         | 1,42       |
| 21               | 1,15         | 1,00       |
| 22               | 1,49         | 1,40       |
| 23               | 2,33         | 1,97       |
| 24               | 2,55         | 2,28       |
| 25               | 1,48         | 1,27       |
| 26               | 1,01         | 0,88       |
| 27               | 1,36         | 1,17       |
| 28               | 1,44         | 1,24       |
| 29               | 0,29         | 0,73       |
| 30               | 0,47         | 0,40       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 1,07         | 0,94       | 0,99             |
| Desvio padrão          | 0,61         | 0,51       | 0,39             |
| Variância              | 0,37         | 0,26       | 0,15             |
| Média +2DP             | 2,28         | 1,97       |                  |
| Média -2DP             | -0,15        | -0,09      |                  |

|                |       |                |      |
|----------------|-------|----------------|------|
| Início eixo xx | -0,15 | Fim do eixo xx | 2,28 |
| Pontos         | 30,00 | Incremento (m) | 0,08 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| -0,15          | 0,09         | 0,08       | 0,02             |
| -0,06          | 0,12         | 0,12       | 0,03             |
| 0,02           | 0,15         | 0,16       | 0,05             |
| 0,11           | 0,19         | 0,21       | 0,08             |
| 0,19           | 0,23         | 0,27       | 0,13             |
| 0,27           | 0,28         | 0,34       | 0,19             |
| 0,36           | 0,33         | 0,41       | 0,27             |
| 0,44           | 0,38         | 0,49       | 0,38             |
| 0,52           | 0,44         | 0,56       | 0,50             |
| 0,61           | 0,49         | 0,63       | 0,63             |
| 0,69           | 0,54         | 0,69       | 0,76             |
| 0,78           | 0,58         | 0,74       | 0,87             |
| 0,86           | 0,62         | 0,77       | 0,96             |
| 0,94           | 0,64         | 0,78       | 1,01             |
| 1,03           | 0,65         | 0,76       | 1,01             |
| 1,11           | 0,65         | 0,73       | 0,97             |
| 1,20           | 0,64         | 0,68       | 0,89             |
| 1,28           | 0,62         | 0,62       | 0,78             |
| 1,36           | 0,58         | 0,55       | 0,65             |
| 1,45           | 0,54         | 0,48       | 0,52             |
| 1,53           | 0,49         | 0,40       | 0,40             |
| 1,61           | 0,44         | 0,33       | 0,29             |
| 1,70           | 0,38         | 0,26       | 0,20             |
| 1,78           | 0,33         | 0,20       | 0,14             |
| 1,87           | 0,28         | 0,15       | 0,09             |
| 1,95           | 0,23         | 0,11       | 0,05             |
| 2,03           | 0,19         | 0,08       | 0,03             |
| 2,12           | 0,15         | 0,06       | 0,02             |
| 2,20           | 0,12         | 0,04       | 0,01             |
| 2,28           | 0,09         | 0,03       | 0,00             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| -0,16                  |



- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: SETOR SUDESTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 1                | 0,42         | 0,19       |
| 2                | 0,66         | 0,17       |
| 3                | 0,46         | 0,24       |
| 4                | 0,47         | 0,38       |
| 5                | 0,58         | 0,28       |
| 6                | 0,89         | 0,49       |
| 7                | 0,78         | 0,48       |
| 8                | 0,82         | 0,56       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 0,63         | 0,35       | 0,47             |
| Desvio padrão          | 0,18         | 0,15       | 0,12             |
| Variância              | 0,03         | 0,02       | 0,01             |
| Média +2DP             | 1,00         | 0,65       |                  |
| Média -2DP             | 0,27         | 0,05       |                  |

|                |      |                |      |
|----------------|------|----------------|------|
| Início eixo xx | 0,05 | Fim do eixo xx | 1,00 |
| Pontos         | 8,00 | Incremento (m) | 0,14 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| 0,05           | 0,01         | 0,36       | 0,01             |
| 0,18           | 0,10         | 1,44       | 0,18             |
| 0,32           | 0,48         | 2,58       | 1,54             |
| 0,45           | 1,34         | 2,07       | 3,41             |
| 0,59           | 2,13         | 0,74       | 1,93             |
| 0,73           | 1,93         | 0,12       | 0,28             |
| 0,86           | 1,00         | 0,01       | 0,01             |
| 1,00           | 0,30         | 0,00       | 0,00             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| -1,21                  |

- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: SETOR SUDESTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 1                | 0,49         | 0,43       |
| 2                | 0,77         | 0,38       |
| 3                | 0,54         | 0,51       |
| 4                | 0,55         | 0,50       |
| 5                | 0,68         | 0,60       |
| 6                | 1,05         | 0,91       |
| 7                | 0,92         | 0,80       |
| 8                | 0,96         | 0,85       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 0,74         | 0,62       | 0,68             |
| Desvio padrão          | 0,21         | 0,20       | 0,15             |
| Variância              | 0,05         | 0,04       | 0,02             |
| Média +2DP             | 1,17         | 1,03       |                  |
| Média -2DP             | 0,32         | 0,21       |                  |

|                |      |                |      |
|----------------|------|----------------|------|
| Início eixo xx | 0,21 | Fim do eixo xx | 1,17 |
| Pontos         | 8,00 | Incremento (m) | 0,14 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| 0,21           | 0,09         | 0,27       | 0,02             |
| 0,35           | 0,34         | 0,81       | 0,22             |
| 0,49           | 0,91         | 1,58       | 1,15             |
| 0,62           | 1,60         | 1,96       | 2,52             |
| 0,76           | 1,87         | 1,55       | 2,34             |
| 0,90           | 1,45         | 0,78       | 0,91             |
| 1,03           | 0,74         | 0,25       | 0,15             |
| 1,17           | 0,25         | 0,05       | 0,01             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| -0,42                  |

- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: SETOR SUDOESTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 9                | 2,13         | 1,35       |
| 10               | 0,61         | 0,43       |
| 11               | 0,43         | 0,24       |
| 12               | 0,31         | 0,16       |
| 13               | 0,44         | 0,32       |
| 14               | 0,39         | 0,22       |
| 15               | 0,87         | 0,63       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 0,74         | 0,48       | 0,56             |
| Desvio padrão          | 0,64         | 0,42       | 0,35             |
| Variância              | 0,41         | 0,17       | 0,12             |
| Média +2DP             | 2,02         | 1,31       |                  |
| Média -2DP             | -0,54        | -0,35      |                  |

|                |       |                |      |
|----------------|-------|----------------|------|
| Início eixo xx | -0,54 | Fim do eixo xx | 2,02 |
| Pontos         | 7,00  | Incremento (m) | 0,43 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| -0,54          | 0,08         | 0,05       | 0,01             |
| -0,11          | 0,26         | 0,35       | 0,18             |
| 0,31           | 0,50         | 0,89       | 0,90             |
| 0,74           | 0,62         | 0,79       | 0,99             |
| 1,17           | 0,50         | 0,24       | 0,25             |
| 1,59           | 0,26         | 0,03       | 0,01             |
| 2,02           | 0,08         | 0,00       | 0,00             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| -0,34                  |

- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: SETOR SUDOESTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 9                | 2,49         | 1,99       |
| 10               | 0,71         | 0,62       |
| 11               | 0,51         | 0,44       |
| 12               | 0,36         | 0,31       |
| 13               | 0,52         | 0,45       |
| 14               | 0,46         | 0,40       |
| 15               | 1,02         | 0,89       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 0,87         | 0,73       | 0,78             |
| Desvio padrão          | 0,75         | 0,59       | 0,46             |
| Variância              | 0,56         | 0,34       | 0,21             |
| Média +2DP             | 2,36         | 1,90       |                  |
| Média -2DP             | -0,62        | -0,45      |                  |

|                |       |                |      |
|----------------|-------|----------------|------|
| Início eixo xx | -0,62 | Fim do eixo xx | 2,36 |
| Pontos         | 7,00  | Incremento (m) | 0,50 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| -0,62          | 0,07         | 0,05       | 0,01             |
| -0,13          | 0,22         | 0,24       | 0,12             |
| 0,37           | 0,43         | 0,57       | 0,58             |
| 0,87           | 0,53         | 0,66       | 0,85             |
| 1,36           | 0,43         | 0,38       | 0,39             |
| 1,86           | 0,22         | 0,10       | 0,06             |
| 2,36           | 0,07         | 0,01       | 0,00             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| -0,15                  |

- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: SETOR NORTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 16               | 0,81         | 0,52       |
| 17               | 0,86         | 0,49       |
| 18               | 1,29         | 0,72       |
| 19               | 1,27         | 0,76       |
| 20               | 1,34         | 0,71       |
| 21               | 0,98         | 0,67       |
| 22               | 1,29         | 1,20       |
| 23               | 1,99         | 1,43       |
| 24               | 2,19         | 1,98       |
| 25               | 1,26         | 0,95       |
| 26               | 0,86         | 0,48       |
| 27               | 1,16         | 0,81       |
| 28               | 1,22         | 0,86       |
| 29               | 0,25         | 0,33       |
| 30               | 0,40         | 0,28       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 1,14         | 0,81       | 0,96             |
| Desvio padrão          | 0,51         | 0,44       | 0,33             |
| Variância              | 0,26         | 0,20       | 0,11             |
| Média +2DP             | 2,15         | 1,70       |                  |
| Média -2DP             | 0,13         | -0,08      |                  |

|                |       |                |      |
|----------------|-------|----------------|------|
| Início eixo xx | -0,08 | Fim do eixo xx | 2,15 |
| Pontos         | 15,00 | Incremento (m) | 0,16 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| -0,08          | 0,04         | 0,12       | 0,01             |
| 0,08           | 0,09         | 0,23       | 0,04             |
| 0,24           | 0,16         | 0,39       | 0,12             |
| 0,40           | 0,27         | 0,58       | 0,30             |
| 0,56           | 0,41         | 0,76       | 0,59             |
| 0,72           | 0,55         | 0,88       | 0,93             |
| 0,88           | 0,69         | 0,89       | 1,16             |
| 1,04           | 0,77         | 0,79       | 1,16             |
| 1,20           | 0,79         | 0,62       | 0,92             |
| 1,36           | 0,72         | 0,42       | 0,58             |
| 1,52           | 0,60         | 0,26       | 0,29             |
| 1,68           | 0,45         | 0,14       | 0,12             |
| 1,84           | 0,31         | 0,06       | 0,04             |
| 1,99           | 0,19         | 0,03       | 0,01             |
| 2,15           | 0,11         | 0,01       | 0,00             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| -0,49                  |

- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: SETOR NORTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 16               | 0,95         | 0,82       |
| 17               | 1,01         | 0,87       |
| 18               | 1,51         | 1,33       |
| 19               | 1,48         | 1,31       |
| 20               | 1,55         | 1,42       |
| 21               | 1,15         | 1,00       |
| 22               | 1,49         | 1,40       |
| 23               | 2,33         | 1,97       |
| 24               | 2,55         | 2,28       |
| 25               | 1,48         | 1,27       |
| 26               | 1,01         | 0,88       |
| 27               | 1,36         | 1,17       |
| 28               | 1,44         | 1,24       |
| 29               | 0,29         | 0,73       |
| 30               | 0,47         | 0,40       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 1,34         | 1,21       | 1,26             |
| Desvio padrão          | 0,59         | 0,47       | 0,37             |
| Variância              | 0,35         | 0,22       | 0,14             |
| Média +2DP             | 2,51         | 2,15       |                  |
| Média -2DP             | 0,16         | 0,26       |                  |

|                |       |                |      |
|----------------|-------|----------------|------|
| Início eixo xx | 0,16  | Fim do eixo xx | 2,51 |
| Pontos         | 15,00 | Incremento (m) | 0,17 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| 0,16           | 0,09         | 0,07       | 0,01             |
| 0,33           | 0,16         | 0,15       | 0,05             |
| 0,50           | 0,24         | 0,28       | 0,13             |
| 0,67           | 0,35         | 0,44       | 0,30             |
| 0,83           | 0,47         | 0,62       | 0,56             |
| 1,00           | 0,58         | 0,77       | 0,85             |
| 1,17           | 0,65         | 0,84       | 1,05             |
| 1,34           | 0,68         | 0,81       | 1,06             |
| 1,51           | 0,65         | 0,69       | 0,86             |
| 1,67           | 0,58         | 0,52       | 0,57             |
| 1,84           | 0,47         | 0,34       | 0,31             |
| 2,01           | 0,35         | 0,20       | 0,14             |
| 2,18           | 0,24         | 0,10       | 0,05             |
| 2,35           | 0,16         | 0,05       | 0,01             |
| 2,51           | 0,09         | 0,02       | 0,00             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| -0,17                  |

APÊNDICE V – PLANILHAS DE CONSTRUÇÃO DOS HISTOGRAMAS ASSOCIADOS AO  
MODELO DE SOWERS (1973)

- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - TODOS OS SETORES - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,19       | 0,13       |
| 2                | 0,17       | 0,18       |
| 3                | 0,24       | 0,24       |
| 4                | 0,38       | 0,32       |
| 5                | 0,28       | 0,41       |
| 6                | 0,49       | 0,51       |
| 7                | 0,48       | 0,61       |
| 8                | 0,56       | 0,71       |
| 9                | 1,35       | 0,79       |
| 10               | 0,43       | 0,87       |
| 11               | 0,24       | 0,92       |
| 12               | 0,16       | 0,94       |
| 13               | 0,32       | 0,93       |
| 14               | 0,22       | 0,89       |
| 15               | 0,63       | 0,83       |
| 16               | 0,52       | 0,75       |
| 17               | 0,49       | 0,65       |
| 18               | 0,72       | 0,55       |
| 19               | 0,76       | 0,45       |
| 20               | 0,71       | 0,36       |
| 21               | 0,67       | 0,28       |
| 22               | 1,20       | 0,21       |
| 23               | 1,43       | 0,15       |
| 24               | 1,98       | 0,10       |
| 25               | 0,95       | 0,07       |
| 26               | 0,48       | 0,05       |
| 27               | 0,81       | 0,03       |
| 28               | 0,86       | 0,02       |
| 29               | 0,33       | 0,01       |
| 30               | 0,28       | 0,01       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,16 | Classes        | 5,00 |
| Máximo (m)             | 1,98 | Incremento (m) | 0,36 |
| Média (m)              | 0,61 | Desv. Pad. (m) | 0,43 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,53      | 56,67          |
| 2,00           | 0,89      | 26,67          |
| 3,00           | 1,25      | 6,67           |
| 4,00           | 1,61      | 6,67           |
| 5,00           | 1,98      | 3,33           |
|                |           | 0,00           |

- HISTOGRAMA: A PRIORI - TODOS OS SETORES - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,42      | 0,07       |
| 2                | 0,66      | 0,09       |
| 3                | 0,46      | 0,12       |
| 4                | 0,47      | 0,16       |
| 5                | 0,58      | 0,20       |
| 6                | 0,89      | 0,25       |
| 7                | 0,78      | 0,31       |
| 8                | 0,82      | 0,37       |
| 9                | 2,13      | 0,44       |
| 10               | 0,61      | 0,51       |
| 11               | 0,43      | 0,57       |
| 12               | 0,31      | 0,63       |
| 13               | 0,44      | 0,69       |
| 14               | 0,39      | 0,73       |
| 15               | 0,87      | 0,75       |
| 16               | 0,81      | 0,76       |
| 17               | 0,86      | 0,76       |
| 18               | 1,29      | 0,74       |
| 19               | 1,27      | 0,71       |
| 20               | 1,34      | 0,66       |
| 21               | 0,98      | 0,60       |
| 22               | 1,29      | 0,54       |
| 23               | 1,99      | 0,47       |
| 24               | 2,19      | 0,41       |
| 25               | 1,26      | 0,34       |
| 26               | 0,86      | 0,28       |
| 27               | 1,16      | 0,23       |
| 28               | 1,22      | 0,18       |
| 29               | 0,25      | 0,14       |
| 30               | 0,40      | 0,10       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,25 | Classes        | 5,00 |
| Máximo (m)             | 2,19 | Incremento (m) | 0,39 |
| Média (m)              | 0,91 | Desv. Pad. (m) | 0,52 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,63      | 36,67          |
| 2,00           | 1,02      | 30,00          |
| 3,00           | 1,41      | 23,33          |
| 4,00           | 1,80      | 0,00           |
| 5,00           | 2,19      | 10,00          |
|                |           | 0,00           |



- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - TODOS OS SETORES - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,43       | 0,08       |
| 2                | 0,38       | 0,12       |
| 3                | 0,51       | 0,16       |
| 4                | 0,50       | 0,21       |
| 5                | 0,60       | 0,27       |
| 6                | 0,91       | 0,34       |
| 7                | 0,80       | 0,41       |
| 8                | 0,85       | 0,49       |
| 9                | 1,99       | 0,56       |
| 10               | 0,62       | 0,63       |
| 11               | 0,44       | 0,69       |
| 12               | 0,31       | 0,74       |
| 13               | 0,45       | 0,77       |
| 14               | 0,40       | 0,78       |
| 15               | 0,89       | 0,76       |
| 16               | 0,82       | 0,73       |
| 17               | 0,87       | 0,68       |
| 18               | 1,33       | 0,62       |
| 19               | 1,31       | 0,55       |
| 20               | 1,42       | 0,48       |
| 21               | 1,00       | 0,40       |
| 22               | 1,40       | 0,33       |
| 23               | 1,97       | 0,26       |
| 24               | 2,28       | 0,20       |
| 25               | 1,27       | 0,15       |
| 26               | 0,88       | 0,11       |
| 27               | 1,17       | 0,08       |
| 28               | 1,24       | 0,06       |
| 29               | 0,73       | 0,04       |
| 30               | 0,40       | 0,03       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,31 | Classes        | 5,00 |
| Máximo (m)             | 2,28 | Incremento (m) | 0,40 |
| Média (m)              | 0,94 | Desv. Pad. (m) | 0,51 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,70      | 36,67          |
| 2,00           | 1,10      | 30,00          |
| 3,00           | 1,49      | 23,33          |
| 4,00           | 1,89      | 0,00           |
| 5,00           | 2,28      | 10,00          |
|                |           | 0,00           |

- HISTOGRAMA: A PRIORI - TODOS OS SETORES - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,49      | 0,09       |
| 2                | 0,77      | 0,12       |
| 3                | 0,54      | 0,15       |
| 4                | 0,55      | 0,19       |
| 5                | 0,68      | 0,23       |
| 6                | 1,05      | 0,28       |
| 7                | 0,92      | 0,33       |
| 8                | 0,96      | 0,38       |
| 9                | 2,49      | 0,44       |
| 10               | 0,71      | 0,49       |
| 11               | 0,51      | 0,54       |
| 12               | 0,36      | 0,58       |
| 13               | 0,52      | 0,62       |
| 14               | 0,46      | 0,64       |
| 15               | 1,02      | 0,65       |
| 16               | 0,95      | 0,65       |
| 17               | 1,01      | 0,64       |
| 18               | 1,51      | 0,62       |
| 19               | 1,48      | 0,58       |
| 20               | 1,55      | 0,54       |
| 21               | 1,15      | 0,49       |
| 22               | 1,49      | 0,44       |
| 23               | 2,33      | 0,38       |
| 24               | 2,55      | 0,33       |
| 25               | 1,48      | 0,28       |
| 26               | 1,01      | 0,23       |
| 27               | 1,36      | 0,19       |
| 28               | 1,44      | 0,15       |
| 29               | 0,29      | 0,12       |
| 30               | 0,47      | 0,09       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,29 | Classes        | 5,00 |
| Máximo (m)             | 2,55 | Incremento (m) | 0,45 |
| Média (m)              | 1,07 | Desv. Pad. (m) | 0,61 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,74      | 36,67          |
| 2,00           | 1,19      | 30,00          |
| 3,00           | 1,64      | 23,33          |
| 4,00           | 2,09      | 0,00           |
| 5,00           | 2,55      | 10,00          |
|                |           | 0,00           |

- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - SETOR SUDESTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,19       | 0,36       |
| 2                | 0,17       | 1,44       |
| 3                | 0,24       | 2,58       |
| 4                | 0,38       | 2,07       |
| 5                | 0,28       | 0,74       |
| 6                | 0,49       | 0,12       |
| 7                | 0,48       | 0,01       |
| 8                | 0,56       | 0,00       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,17 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 0,56 | Incremento (m) | 0,13 |
| Média (m)              | 0,35 | Desv. Pad. (m) | 0,15 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,30      | 50,00          |
| 2,00           | 0,43      | 12,50          |
| 3,00           | 0,57      | 37,50          |

0,00

- HISTOGRAMA: A PRIORI - SETOR SUDESTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,42      | 0,01       |
| 2                | 0,66      | 0,10       |
| 3                | 0,46      | 0,48       |
| 4                | 0,47      | 1,34       |
| 5                | 0,58      | 2,13       |
| 6                | 0,89      | 1,93       |
| 7                | 0,78      | 1,00       |
| 8                | 0,82      | 0,30       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,42 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 0,89 | Incremento (m) | 0,16 |
| Média (m)              | 0,63 | Desv. Pad. (m) | 0,18 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,58      | 37,50          |
| 2,00           | 0,73      | 25,00          |
| 3,00           | 0,89      | 37,50          |

0,00

- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - SETOR SUDESTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,43       | 0,27       |
| 2                | 0,38       | 0,81       |
| 3                | 0,51       | 1,58       |
| 4                | 0,50       | 1,96       |
| 5                | 0,60       | 1,55       |
| 6                | 0,91       | 0,78       |
| 7                | 0,80       | 0,25       |
| 8                | 0,85       | 0,05       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,38 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 0,91 | Incremento (m) | 0,18 |
| Média (m)              | 0,62 | Desv. Pad. (m) | 0,20 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,56      | 50,00          |
| 2,00           | 0,73      | 12,50          |
| 3,00           | 0,91      | 37,50          |

0,00

- HISTOGRAMA: A PRIORI - SETOR SUDESTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,49      | 0,09       |
| 2                | 0,77      | 0,34       |
| 3                | 0,54      | 0,91       |
| 4                | 0,55      | 1,60       |
| 5                | 0,68      | 1,87       |
| 6                | 1,05      | 1,45       |
| 7                | 0,92      | 0,74       |
| 8                | 0,96      | 0,25       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,49 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 1,05 | Incremento (m) | 0,19 |
| Média (m)              | 0,74 | Desv. Pad. (m) | 0,21 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,68      | 37,50          |
| 2,00           | 0,86      | 25,00          |
| 3,00           | 1,05      | 37,50          |

0,00

- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - SETOR SUDOESTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 9                | 1,35       | 0,05       |
| 10               | 0,43       | 0,35       |
| 11               | 0,24       | 0,89       |
| 12               | 0,16       | 0,79       |
| 13               | 0,32       | 0,24       |
| 14               | 0,22       | 0,03       |
| 15               | 0,63       | 0,00       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,16 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 1,35 | Incremento (m) | 0,40 |
| Média (m)              | 0,48 | Desv. Pad. (m) | 0,42 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,56      | 71,43          |
| 2,00           | 0,95      | 14,29          |
| 3,00           | 1,35      | 14,29          |

0,00

- HISTOGRAMA: A PRIORI - SETOR SUDOESTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 9                | 2,13      | 0,08       |
| 10               | 0,61      | 0,26       |
| 11               | 0,43      | 0,50       |
| 12               | 0,31      | 0,62       |
| 13               | 0,44      | 0,50       |
| 14               | 0,39      | 0,26       |
| 15               | 0,87      | 0,08       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,31 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 2,13 | Incremento (m) | 0,61 |
| Média (m)              | 0,74 | Desv. Pad. (m) | 0,64 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,91      | 85,71          |
| 2,00           | 1,52      | 0,00           |
| 3,00           | 2,13      | 14,29          |

0,00



- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - SETOR SUDOESTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 9                | 1,99       | 0,05       |
| 10               | 0,62       | 0,24       |
| 11               | 0,44       | 0,57       |
| 12               | 0,31       | 0,66       |
| 13               | 0,45       | 0,38       |
| 14               | 0,40       | 0,10       |
| 15               | 0,89       | 0,01       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,31 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 1,99 | Incremento (m) | 0,56 |
| Média (m)              | 0,73 | Desv. Pad. (m) | 0,59 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,87      | 71,43          |
| 2,00           | 1,43      | 14,29          |
| 3,00           | 1,99      | 14,29          |

0,00

- HISTOGRAMA: A PRIORI - SETOR SUDOESTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 9                | 2,49      | 0,07       |
| 10               | 0,71      | 0,22       |
| 11               | 0,51      | 0,43       |
| 12               | 0,36      | 0,53       |
| 13               | 0,52      | 0,43       |
| 14               | 0,46      | 0,22       |
| 15               | 1,02      | 0,07       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,36 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 2,49 | Incremento (m) | 0,71 |
| Média (m)              | 0,87 | Desv. Pad. (m) | 0,75 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 1,07      | 85,71          |
| 2,00           | 1,78      | 0,00           |
| 3,00           | 2,49      | 14,29          |

0,00

- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - SETOR NORTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 16               | 0,52       | 0,12       |
| 17               | 0,49       | 0,23       |
| 18               | 0,72       | 0,39       |
| 19               | 0,76       | 0,58       |
| 20               | 0,71       | 0,76       |
| 21               | 0,67       | 0,88       |
| 22               | 1,20       | 0,89       |
| 23               | 1,43       | 0,79       |
| 24               | 1,98       | 0,62       |
| 25               | 0,95       | 0,42       |
| 26               | 0,48       | 0,26       |
| 27               | 0,81       | 0,14       |
| 28               | 0,86       | 0,06       |
| 29               | 0,33       | 0,03       |
| 30               | 0,28       | 0,01       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,28 | Classes        | 4,00 |
| Máximo (m)             | 1,98 | Incremento (m) | 0,42 |
| Média (m)              | 0,81 | Desv. Pad. (m) | 0,44 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,70      | 40,00          |
| 2,00           | 1,13      | 40,00          |
| 3,00           | 1,55      | 13,33          |
| 4,00           | 1,98      | 6,67           |
|                |           | 0,00           |

- HISTOGRAMA: A PRIORI - SETOR NORTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 16               | 0,81      | 0,04       |
| 17               | 0,86      | 0,09       |
| 18               | 1,29      | 0,16       |
| 19               | 1,27      | 0,27       |
| 20               | 1,34      | 0,41       |
| 21               | 0,98      | 0,55       |
| 22               | 1,29      | 0,69       |
| 23               | 1,99      | 0,77       |
| 24               | 2,19      | 0,79       |
| 25               | 1,26      | 0,72       |
| 26               | 0,86      | 0,60       |
| 27               | 1,16      | 0,45       |
| 28               | 1,22      | 0,31       |
| 29               | 0,25      | 0,19       |
| 30               | 0,40      | 0,11       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,25 | Classes        | 4,00 |
| Máximo (m)             | 2,19 | Incremento (m) | 0,49 |
| Média (m)              | 1,14 | Desv. Pad. (m) | 0,51 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,73      | 13,33          |
| 2,00           | 1,22      | 33,33          |
| 3,00           | 1,70      | 40,00          |
| 4,00           | 2,19      | 13,33          |
|                |           | 0,00           |

- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - SETOR NORTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 16               | 0,82       | 0,07       |
| 17               | 0,87       | 0,15       |
| 18               | 1,33       | 0,28       |
| 19               | 1,31       | 0,44       |
| 20               | 1,42       | 0,62       |
| 21               | 1,00       | 0,77       |
| 22               | 1,40       | 0,84       |
| 23               | 1,97       | 0,81       |
| 24               | 2,28       | 0,69       |
| 25               | 1,27       | 0,52       |
| 26               | 0,88       | 0,34       |
| 27               | 1,17       | 0,20       |
| 28               | 1,24       | 0,10       |
| 29               | 0,73       | 0,05       |
| 30               | 0,40       | 0,02       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,40 | Classes        | 4,00 |
| Máximo (m)             | 2,28 | Incremento (m) | 0,47 |
| Média (m)              | 1,21 | Desv. Pad. (m) | 0,47 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,87      | 26,67          |
| 2,00           | 1,34      | 46,67          |
| 3,00           | 1,81      | 13,33          |
| 4,00           | 2,28      | 13,33          |
|                |           | 0,00           |

- HISTOGRAMA: A PRIORI - SETOR NORTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 16               | 0,95      | 0,09       |
| 17               | 1,01      | 0,16       |
| 18               | 1,51      | 0,24       |
| 19               | 1,48      | 0,35       |
| 20               | 1,55      | 0,47       |
| 21               | 1,15      | 0,58       |
| 22               | 1,49      | 0,65       |
| 23               | 2,33      | 0,68       |
| 24               | 2,55      | 0,65       |
| 25               | 1,48      | 0,58       |
| 26               | 1,01      | 0,47       |
| 27               | 1,36      | 0,35       |
| 28               | 1,44      | 0,24       |
| 29               | 0,29      | 0,16       |
| 30               | 0,47      | 0,09       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,29 | Classes        | 4,00 |
| Máximo (m)             | 2,55 | Incremento (m) | 0,56 |
| Média (m)              | 1,34 | Desv. Pad. (m) | 0,59 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,85      | 13,33          |
| 2,00           | 1,42      | 33,33          |
| 3,00           | 1,98      | 40,00          |
| 4,00           | 2,55      | 13,33          |
|                |           | 0,00           |

# **APÊNDICE VI – PLANILHAS DE CÁLCULO DE RECALQUE PARA CADA MS PELO MOD. SIMP. DE YEN E SCANLON (1975)**

| <b>MS \ DIAS</b>           | <b>30</b> | <b>60</b> | <b>90</b> | <b>120</b> | <b>150</b> | <b>180</b> | <b>210</b> | <b>240</b> | <b>270</b> | <b>300</b> | <b>330</b> | <b>360</b> |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>01</b>                  |           |           |           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>a'</b>                  | 0,101     | 0,101     | 0,101     | 0,101      | 0,101      | 0,101      | 0,101      | 0,101      | 0,101      | 0,101      | 0,101      | 0,101      |
| <b>b'</b>                  | 0,139     | 0,139     | 0,139     | 0,139      | 0,139      | 0,139      | 0,139      | 0,139      | 0,139      | 0,139      | 0,139      | 0,139      |
| <b>log t</b>               | 1,48      | 1,78      | 1,95      | 2,08       | 2,18       | 2,26       | 2,32       | 2,38       | 2,43       | 2,48       | 2,52       | 2,56       |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,10     | -0,15     | -0,17     | -0,19      | -0,20      | -0,21      | -0,22      | -0,23      | -0,24      | -0,24      | -0,25      | -0,25      |
| <b>02</b>                  |           |           |           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>a'</b>                  | 0,132     | 0,132     | 0,132     | 0,132      | 0,132      | 0,132      | 0,132      | 0,132      | 0,132      | 0,132      | 0,132      | 0,132      |
| <b>b'</b>                  | 0,158     | 0,158     | 0,158     | 0,158      | 0,158      | 0,158      | 0,158      | 0,158      | 0,158      | 0,158      | 0,158      | 0,158      |
| <b>log t</b>               | 1,48      | 1,78      | 1,95      | 2,08       | 2,18       | 2,26       | 2,32       | 2,38       | 2,43       | 2,48       | 2,52       | 2,56       |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,10     | -0,15     | -0,18     | -0,20      | -0,21      | -0,22      | -0,23      | -0,24      | -0,25      | -0,26      | -0,27      | -0,27      |
| <b>03</b>                  |           |           |           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>a'</b>                  | 0,165     | 0,165     | 0,165     | 0,165      | 0,165      | 0,165      | 0,165      | 0,165      | 0,165      | 0,165      | 0,165      | 0,165      |
| <b>b'</b>                  | 0,195     | 0,195     | 0,195     | 0,195      | 0,195      | 0,195      | 0,195      | 0,195      | 0,195      | 0,195      | 0,195      | 0,195      |
| <b>log t</b>               | 1,48      | 1,78      | 1,95      | 2,08       | 2,18       | 2,26       | 2,32       | 2,38       | 2,43       | 2,48       | 2,52       | 2,56       |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,12     | -0,18     | -0,22     | -0,24      | -0,26      | -0,27      | -0,29      | -0,30      | -0,31      | -0,32      | -0,33      | -0,33      |
| <b>04</b>                  |           |           |           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>a'</b>                  | 0,127     | 0,127     | 0,127     | 0,127      | 0,127      | 0,127      | 0,127      | 0,127      | 0,127      | 0,127      | 0,127      | 0,127      |
| <b>b'</b>                  | 0,206     | 0,206     | 0,206     | 0,206      | 0,206      | 0,206      | 0,206      | 0,206      | 0,206      | 0,206      | 0,206      | 0,206      |
| <b>log t</b>               | 1,48      | 1,78      | 1,95      | 2,08       | 2,18       | 2,26       | 2,32       | 2,38       | 2,43       | 2,48       | 2,52       | 2,56       |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,18     | -0,24     | -0,27     | -0,30      | -0,32      | -0,34      | -0,35      | -0,36      | -0,37      | -0,38      | -0,39      | -0,40      |
| <b>05</b>                  |           |           |           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>a'</b>                  | 0,195     | 0,195     | 0,195     | 0,195      | 0,195      | 0,195      | 0,195      | 0,195      | 0,195      | 0,195      | 0,195      | 0,195      |
| <b>b'</b>                  | 0,248     | 0,248     | 0,248     | 0,248      | 0,248      | 0,248      | 0,248      | 0,248      | 0,248      | 0,248      | 0,248      | 0,248      |
| <b>log t</b>               | 1,48      | 1,78      | 1,95      | 2,08       | 2,18       | 2,26       | 2,32       | 2,38       | 2,43       | 2,48       | 2,52       | 2,56       |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,17     | -0,25     | -0,29     | -0,32      | -0,34      | -0,36      | -0,38      | -0,39      | -0,41      | -0,42      | -0,43      | -0,44      |

| MS \ DIAS                  | 390   | 420   | 450   | 480   | 510   | 540   | 570   | 600   | 630   | 660   | 690   | 720   |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>01</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,101 | 0,101 | 0,101 | 0,101 | 0,101 | 0,101 | 0,101 | 0,101 | 0,101 | 0,101 | 0,101 | 0,101 |
| <b>b'</b>                  | 0,139 | 0,139 | 0,139 | 0,139 | 0,139 | 0,139 | 0,139 | 0,139 | 0,139 | 0,139 | 0,139 | 0,139 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,26 | -0,26 | -0,27 | -0,27 | -0,28 | -0,28 | -0,28 | -0,29 | -0,29 | -0,29 | -0,29 | -0,30 |
| <b>02</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,132 | 0,132 | 0,132 | 0,132 | 0,132 | 0,132 | 0,132 | 0,132 | 0,132 | 0,132 | 0,132 | 0,132 |
| <b>b'</b>                  | 0,158 | 0,158 | 0,158 | 0,158 | 0,158 | 0,158 | 0,158 | 0,158 | 0,158 | 0,158 | 0,158 | 0,158 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,28 | -0,28 | -0,29 | -0,29 | -0,30 | -0,30 | -0,30 | -0,31 | -0,31 | -0,31 | -0,32 | -0,32 |
| <b>03</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,165 | 0,165 | 0,165 | 0,165 | 0,165 | 0,165 | 0,165 | 0,165 | 0,165 | 0,165 | 0,165 | 0,165 |
| <b>b'</b>                  | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,34 | -0,35 | -0,35 | -0,36 | -0,36 | -0,37 | -0,37 | -0,38 | -0,38 | -0,38 | -0,39 | -0,39 |
| <b>04</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 |
| <b>b'</b>                  | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,41 | -0,41 | -0,42 | -0,42 | -0,43 | -0,43 | -0,44 | -0,44 | -0,45 | -0,45 | -0,46 | -0,46 |
| <b>05</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 | 0,195 |
| <b>b'</b>                  | 0,248 | 0,248 | 0,248 | 0,248 | 0,248 | 0,248 | 0,248 | 0,248 | 0,248 | 0,248 | 0,248 | 0,248 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,45 | -0,45 | -0,46 | -0,47 | -0,48 | -0,48 | -0,49 | -0,49 | -0,50 | -0,50 | -0,51 | -0,51 |



| MS \ DIAS                  | 30    | 60    | 90    | 120   | 150   | 180   | 210   | 240   | 270   | 300   | 330   | 360   |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>06</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 |
| <b>b'</b>                  | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,29 | -0,39 | -0,45 | -0,49 | -0,52 | -0,55 | -0,57 | -0,59 | -0,61 | -0,62 | -0,64 | -0,65 |
| <b>07</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 |
| <b>b'</b>                  | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,23 | -0,32 | -0,37 | -0,41 | -0,44 | -0,46 | -0,48 | -0,50 | -0,52 | -0,53 | -0,54 | -0,55 |
| <b>08</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 |
| <b>b'</b>                  | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,40 | -0,51 | -0,57 | -0,62 | -0,65 | -0,68 | -0,70 | -0,73 | -0,74 | -0,76 | -0,78 | -0,79 |
| <b>09</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 |
| <b>b'</b>                  | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,68 | -0,92 | -1,05 | -1,15 | -1,23 | -1,29 | -1,34 | -1,38 | -1,42 | -1,46 | -1,49 | -1,52 |
| <b>10</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 |
| <b>b'</b>                  | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,28 | -0,35 | -0,40 | -0,43 | -0,45 | -0,47 | -0,49 | -0,51 | -0,52 | -0,53 | -0,54 | -0,55 |

| MS \ DIAS                  | 390   | 420   | 450   | 480   | 510   | 540   | 570   | 600   | 630   | 660   | 690   | 720   |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>06</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 | 0,206 |
| <b>b'</b>                  | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 |       |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,66 | -0,67 | -0,68 | -0,69 | -0,70 | -0,71 | -0,72 | -0,73 | -0,73 | -0,74 | -0,75 | 0,21  |
| <b>07</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,225 |
| <b>b'</b>                  | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,57 | -0,58 | -0,58 | -0,59 | -0,60 | -0,61 | -0,62 | -0,62 | -0,63 | -0,63 | -0,64 | -0,65 |
| <b>08</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 |
| <b>b'</b>                  | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,80 | -0,81 | -0,83 | -0,84 | -0,84 | -0,85 | -0,86 | -0,87 | -0,88 | -0,89 | -0,89 | -0,90 |
| <b>09</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 |
| <b>b'</b>                  | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 | 0,775 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -1,55 | -1,57 | -1,60 | -1,62 | -1,64 | -1,66 | -1,68 | -1,69 | -1,71 | -1,73 | -1,74 | -1,75 |
| <b>10</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,099 |
| <b>b'</b>                  | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 | 0,254 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,56 | -0,57 | -0,58 | -0,58 | -0,59 | -0,60 | -0,60 | -0,61 | -0,61 | -0,62 | -0,62 | -0,63 |

| MS \ DIAS                  | 30    | 60    | 90    | 120   | 150   | 180   | 210   | 240   | 270   | 300   | 330   | 360   |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>11</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 |
| <b>b'</b>                  | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,14 | -0,19 | -0,22 | -0,24 | -0,26 | -0,27 | -0,28 | -0,29 | -0,30 | -0,31 | -0,32 | -0,32 |
| <b>12</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 |
| <b>b'</b>                  | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,10 | -0,14 | -0,16 | -0,17 | -0,19 | -0,20 | -0,20 | -0,21 | -0,22 | -0,22 | -0,23 | -0,23 |
| <b>13</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 |
| <b>b'</b>                  | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,15 | -0,19 | -0,22 | -0,24 | -0,26 | -0,27 | -0,28 | -0,29 | -0,30 | -0,31 | -0,31 | -0,32 |
| <b>14</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 |
| <b>b'</b>                  | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,16 | -0,22 | -0,25 | -0,27 | -0,29 | -0,30 | -0,31 | -0,32 | -0,33 | -0,34 | -0,35 | -0,35 |
| <b>15</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 |
| <b>b'</b>                  | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,39 | -0,50 | -0,56 | -0,61 | -0,64 | -0,67 | -0,70 | -0,72 | -0,74 | -0,75 | -0,77 | -0,78 |

| MS \ DIAS                  | 390   | 420   | 450   | 480   | 510   | 540   | 570   | 600   | 630   | 660   | 690   | 720   |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>11</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 | 0,109 |
| <b>b'</b>                  | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 | 0,169 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,33 | -0,33 | -0,34 | -0,34 | -0,35 | -0,35 | -0,36 | -0,36 | -0,36 | -0,37 | -0,37 | -0,37 |
| <b>12</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 |
| <b>b'</b>                  | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,24 | -0,24 | -0,24 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,27 | -0,27 |
| <b>13</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 |
| <b>b'</b>                  | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 | 0,161 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,33 | -0,33 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,35 | -0,35 | -0,36 | -0,36 | -0,36 | -0,37 | -0,37 |
| <b>14</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 | 0,095 |
| <b>b'</b>                  | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,36 | -0,37 | -0,37 | -0,38 | -0,38 | -0,38 | -0,39 | -0,39 | -0,40 | -0,40 | -0,40 | -0,41 |
| <b>15</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 |
| <b>b'</b>                  | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,365 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,80 | -0,81 | -0,82 | -0,83 | -0,84 | -0,85 | -0,86 | -0,86 | -0,87 | -0,88 | -0,89 | -0,89 |

| MS \ DIAS                  | 30    | 60    | 90    | 120   | 150   | 180   | 210   | 240   | 270   | 300   | 330   | 360   |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>16</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 |
| <b>b'</b>                  | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,22 | -0,31 | -0,36 | -0,40 | -0,43 | -0,45 | -0,47 | -0,49 | -0,51 | -0,52 | -0,53 | -0,54 |
| <b>17</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 |
| <b>b'</b>                  | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,29 | -0,38 | -0,44 | -0,47 | -0,50 | -0,53 | -0,55 | -0,57 | -0,58 | -0,60 | -0,61 | -0,62 |
| <b>18</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 |
| <b>b'</b>                  | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,35 | -0,48 | -0,55 | -0,61 | -0,65 | -0,68 | -0,71 | -0,74 | -0,76 | -0,78 | -0,80 | -0,82 |
| <b>19</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 |
| <b>b'</b>                  | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,36 | -0,50 | -0,58 | -0,63 | -0,67 | -0,71 | -0,74 | -0,76 | -0,79 | -0,81 | -0,82 | -0,84 |
| <b>20</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 |
| <b>b'</b>                  | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,30 | -0,45 | -0,53 | -0,59 | -0,64 | -0,68 | -0,71 | -0,74 | -0,77 | -0,79 | -0,81 | -0,83 |

| MS \ DIAS                  | 390   | 420   | 450   | 480   | 510   | 540   | 570   | 600   | 630   | 660   | 690   | 720   |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>16</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 | 0,235 |
| <b>b'</b>                  | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,55 | -0,56 | -0,57 | -0,58 | -0,59 | -0,60 | -0,61 | -0,61 | -0,62 | -0,62 | -0,63 | -0,64 |
| <b>17</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 | 0,162 |
| <b>b'</b>                  | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 | 0,306 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,63 | -0,64 | -0,65 | -0,66 | -0,67 | -0,67 | -0,68 | -0,69 | -0,69 | -0,70 | -0,71 | -0,71 |
| <b>18</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 | 0,292 |
| <b>b'</b>                  | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 | 0,433 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,83 | -0,84 | -0,86 | -0,87 | -0,88 | -0,89 | -0,90 | -0,91 | -0,92 | -0,93 | -0,94 | -0,95 |
| <b>19</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 | 0,288 |
| <b>b'</b>                  | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 | 0,442 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,86 | -0,87 | -0,88 | -0,90 | -0,91 | -0,92 | -0,93 | -0,94 | -0,95 | -0,96 | -0,97 | -0,97 |
| <b>20</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 | 0,411 |
| <b>b'</b>                  | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 | 0,484 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,84 | -0,86 | -0,87 | -0,89 | -0,90 | -0,91 | -0,92 | -0,93 | -0,94 | -0,95 | -0,96 | -0,97 |

| MS \ DIAS                  | 30    | 60    | 90    | 120   | 150   | 180   | 210   | 240   | 270   | 300   | 330   | 360   |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>21</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 |
| <b>b'</b>                  | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,40 | -0,50 | -0,56 | -0,60 | -0,64 | -0,66 | -0,69 | -0,71 | -0,73 | -0,74 | -0,76 | -0,77 |
| <b>22</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 |
| <b>b'</b>                  | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,60 | -0,75 | -0,84 | -0,90 | -0,95 | -0,98 | -1,02 | -1,04 | -1,07 | -1,09 | -1,11 | -1,13 |
| <b>23</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 |
| <b>b'</b>                  | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,90 | -1,12 | -1,25 | -1,34 | -1,41 | -1,47 | -1,51 | -1,56 | -1,59 | -1,63 | -1,66 | -1,69 |
| <b>24</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 |
| <b>b'</b>                  | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -1,14 | -1,39 | -1,54 | -1,65 | -1,73 | -1,80 | -1,85 | -1,90 | -1,95 | -1,99 | -2,02 | -2,05 |
| <b>25</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 |
| <b>b'</b>                  | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,48 | -0,61 | -0,69 | -0,74 | -0,78 | -0,82 | -0,85 | -0,87 | -0,90 | -0,91 | -0,93 | -0,95 |

| MS \ DIAS                  | 390   | 420   | 450   | 480   | 510   | 540   | 570   | 600   | 630   | 660   | 690   | 720   |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>21</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 | 0,114 |
| <b>b'</b>                  | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 | 0,345 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,78 | -0,79 | -0,80 | -0,81 | -0,82 | -0,83 | -0,84 | -0,85 | -0,85 | -0,86 | -0,87 | -0,87 |
| <b>22</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 | 0,117 |
| <b>b'</b>                  | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -1,15 | -1,16 | -1,18 | -1,19 | -1,20 | -1,22 | -1,23 | -1,24 | -1,25 | -1,26 | -1,27 | -1,28 |
| <b>23</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 | 0,185 |
| <b>b'</b>                  | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 | 0,732 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -1,71 | -1,74 | -1,76 | -1,78 | -1,80 | -1,82 | -1,83 | -1,85 | -1,86 | -1,88 | -1,89 | -1,91 |
| <b>24</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 |
| <b>b'</b>                  | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 | 0,850 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -2,08 | -2,11 | -2,14 | -2,16 | -2,18 | -2,20 | -2,22 | -2,24 | -2,26 | -2,28 | -2,29 | -2,31 |
| <b>25</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 | 0,153 |
| <b>b'</b>                  | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 | 0,431 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,96 | -0,98 | -0,99 | -1,00 | -1,01 | -1,02 | -1,03 | -1,04 | -1,05 | -1,06 | -1,07 | -1,08 |



| MS \ DIAS                  | 30    | 60    | 90    | 120   | 150   | 180   | 210   | 240   | 270   | 300   | 330   | 360   |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>26</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 |
| <b>b'</b>                  | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,21 | -0,30 | -0,36 | -0,40 | -0,43 | -0,46 | -0,48 | -0,49 | -0,51 | -0,53 | -0,54 | -0,55 |
| <b>27</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 |
| <b>b'</b>                  | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,51 | -0,63 | -0,71 | -0,76 | -0,80 | -0,83 | -0,86 | -0,88 | -0,90 | -0,92 | -0,94 | -0,96 |
| <b>28</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 |
| <b>b'</b>                  | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,55 | -0,70 | -0,78 | -0,84 | -0,89 | -0,93 | -0,96 | -0,99 | -1,01 | -1,04 | -1,06 | -1,08 |
| <b>29</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 |
| <b>b'</b>                  | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,30 | -0,39 | -0,44 | -0,48 | -0,50 | -0,53 | -0,54 | -0,56 | -0,58 | -0,59 | -0,60 | -0,61 |
| <b>30</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 |
| <b>b'</b>                  | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 |
| <b>log t</b>               | 1,48  | 1,78  | 1,95  | 2,08  | 2,18  | 2,26  | 2,32  | 2,38  | 2,43  | 2,48  | 2,52  | 2,56  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,21 | -0,27 | -0,30 | -0,32 | -0,34 | -0,35 | -0,36 | -0,37 | -0,38 | -0,39 | -0,40 | -0,40 |

| MS \ DIAS                  | 390   | 420   | 450   | 480   | 510   | 540   | 570   | 600   | 630   | 660   | 690   | 720   |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>26</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 | 0,257 |
| <b>b'</b>                  | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 | 0,316 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,56 | -0,57 | -0,58 | -0,59 | -0,60 | -0,61 | -0,61 | -0,62 | -0,63 | -0,63 | -0,64 | -0,65 |
| <b>27</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 | 0,105 |
| <b>b'</b>                  | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 | 0,415 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,97 | -0,98 | -1,00 | -1,01 | -1,02 | -1,03 | -1,04 | -1,05 | -1,06 | -1,07 | -1,07 | -1,08 |
| <b>28</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 | 0,172 |
| <b>b'</b>                  | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -1,09 | -1,11 | -1,12 | -1,14 | -1,15 | -1,16 | -1,17 | -1,18 | -1,19 | -1,20 | -1,21 | -1,22 |
| <b>29</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 | 0,116 |
| <b>b'</b>                  | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 0,285 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,62 | -0,63 | -0,64 | -0,65 | -0,65 | -0,66 | -0,67 | -0,67 | -0,68 | -0,69 | -0,69 | -0,70 |
| <b>30</b>                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>a'</b>                  | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 |
| <b>b'</b>                  | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 |
| <b>log t</b>               | 2,59  | 2,62  | 2,65  | 2,68  | 2,71  | 2,73  | 2,76  | 2,78  | 2,80  | 2,82  | 2,84  | 2,86  |
| <b>Rec. Secundário (m)</b> | -0,41 | -0,42 | -0,42 | -0,43 | -0,43 | -0,44 | -0,44 | -0,44 | -0,45 | -0,45 | -0,45 | -0,46 |

# **APÊNDICE VII – PLANILHA RESUMO DE RECALQUES OBTIDOS PELO MODELO SIMP. DE YEN E SCANLON (1975)**

| <b>DIAS<br/>MS</b> | <b>0</b> | <b>30</b> | <b>60</b> | <b>90</b> | <b>120</b> | <b>150</b> | <b>180</b> | <b>210</b> | <b>240</b> | <b>270</b> | <b>300</b> | <b>330</b> | <b>360</b> | <b>390</b> | <b>420</b> | <b>450</b> | <b>480</b> | <b>510</b> | <b>540</b> | <b>570</b> | <b>600</b> | <b>630</b> | <b>660</b> | <b>690</b> | <b>720</b> |
|--------------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>01 - YeS</b>    | 0,00     | -0,10     | -0,15     | -0,17     | -0,19      | -0,20      | -0,21      | -0,22      | -0,23      | -0,24      | -0,24      | -0,25      | -0,25      | -0,26      | -0,26      | -0,27      | -0,27      | -0,28      | -0,28      | -0,28      | -0,29      | -0,29      | -0,29      | -0,29      | -0,30      |
| <b>02 - YeS</b>    | 0,00     | -0,10     | -0,15     | -0,18     | -0,20      | -0,21      | -0,22      | -0,23      | -0,24      | -0,25      | -0,26      | -0,27      | -0,27      | -0,28      | -0,28      | -0,29      | -0,29      | -0,30      | -0,30      | -0,30      | -0,31      | -0,31      | -0,31      | -0,32      | -0,32      |
| <b>03 - YeS</b>    | 0,00     | -0,12     | -0,18     | -0,22     | -0,24      | -0,26      | -0,27      | -0,29      | -0,30      | -0,31      | -0,32      | -0,33      | -0,33      | -0,34      | -0,35      | -0,35      | -0,36      | -0,36      | -0,37      | -0,37      | -0,38      | -0,38      | -0,38      | -0,39      | -0,39      |
| <b>04 - YeS</b>    | 0,00     | -0,18     | -0,24     | -0,27     | -0,30      | -0,32      | -0,34      | -0,35      | -0,36      | -0,37      | -0,38      | -0,39      | -0,40      | -0,41      | -0,41      | -0,42      | -0,42      | -0,43      | -0,43      | -0,44      | -0,44      | -0,45      | -0,45      | -0,46      | -0,46      |
| <b>05 - YeS</b>    | 0,00     | -0,17     | -0,25     | -0,29     | -0,32      | -0,34      | -0,36      | -0,38      | -0,39      | -0,41      | -0,42      | -0,43      | -0,44      | -0,45      | -0,45      | -0,46      | -0,47      | -0,48      | -0,48      | -0,49      | -0,49      | -0,50      | -0,50      | -0,51      | -0,51      |
| <b>06 - YeS</b>    | 0,00     | -0,29     | -0,39     | -0,45     | -0,49      | -0,52      | -0,55      | -0,57      | -0,59      | -0,61      | -0,62      | -0,64      | -0,65      | -0,66      | -0,67      | -0,68      | -0,69      | -0,70      | -0,71      | -0,72      | -0,73      | -0,73      | -0,74      | -0,75      | -0,75      |
| <b>07 - YeS</b>    | 0,00     | -0,23     | -0,32     | -0,37     | -0,41      | -0,44      | -0,46      | -0,48      | -0,50      | -0,52      | -0,53      | -0,54      | -0,55      | -0,57      | -0,58      | -0,58      | -0,59      | -0,60      | -0,61      | -0,62      | -0,62      | -0,63      | -0,63      | -0,64      | -0,65      |
| <b>08 - YeS</b>    | 0,00     | -0,40     | -0,51     | -0,57     | -0,62      | -0,65      | -0,68      | -0,70      | -0,73      | -0,74      | -0,76      | -0,78      | -0,79      | -0,80      | -0,81      | -0,83      | -0,84      | -0,84      | -0,85      | -0,86      | -0,87      | -0,88      | -0,89      | -0,89      | -0,90      |
| <b>09 - YeS</b>    | 0,00     | -0,68     | -0,92     | -1,05     | -1,15      | -1,23      | -1,29      | -1,34      | -1,38      | -1,42      | -1,46      | -1,49      | -1,52      | -1,55      | -1,57      | -1,60      | -1,62      | -1,64      | -1,66      | -1,68      | -1,69      | -1,71      | -1,73      | -1,74      | -1,75      |
| <b>10 - YeS</b>    | 0,00     | -0,28     | -0,35     | -0,40     | -0,43      | -0,45      | -0,47      | -0,49      | -0,51      | -0,52      | -0,53      | -0,54      | -0,55      | -0,56      | -0,57      | -0,58      | -0,58      | -0,59      | -0,60      | -0,60      | -0,61      | -0,61      | -0,62      | -0,62      | -0,63      |
| <b>11 - YeS</b>    | 0,00     | -0,14     | -0,19     | -0,22     | -0,24      | -0,26      | -0,27      | -0,28      | -0,29      | -0,30      | -0,31      | -0,32      | -0,32      | -0,33      | -0,33      | -0,34      | -0,34      | -0,35      | -0,35      | -0,36      | -0,36      | -0,36      | -0,37      | -0,37      | -0,37      |
| <b>12 - YeS</b>    | 0,00     | -0,10     | -0,14     | -0,16     | -0,17      | -0,19      | -0,20      | -0,20      | -0,21      | -0,22      | -0,22      | -0,23      | -0,23      | -0,24      | -0,24      | -0,24      | -0,25      | -0,25      | -0,25      | -0,26      | -0,26      | -0,26      | -0,26      | -0,27      | -0,27      |
| <b>13 - YeS</b>    | 0,00     | -0,15     | -0,19     | -0,22     | -0,24      | -0,26      | -0,27      | -0,28      | -0,29      | -0,30      | -0,31      | -0,31      | -0,32      | -0,33      | -0,33      | -0,34      | -0,34      | -0,34      | -0,35      | -0,35      | -0,36      | -0,36      | -0,36      | -0,37      | -0,37      |
| <b>14 - YeS</b>    | 0,00     | -0,16     | -0,22     | -0,25     | -0,27      | -0,29      | -0,30      | -0,31      | -0,32      | -0,33      | -0,34      | -0,35      | -0,35      | -0,36      | -0,37      | -0,37      | -0,38      | -0,38      | -0,38      | -0,39      | -0,39      | -0,40      | -0,40      | -0,40      | -0,41      |
| <b>15 - YeS</b>    | 0,00     | -0,39     | -0,50     | -0,56     | -0,61      | -0,64      | -0,67      | -0,70      | -0,72      | -0,74      | -0,75      | -0,77      | -0,78      | -0,80      | -0,81      | -0,82      | -0,83      | -0,84      | -0,85      | -0,86      | -0,86      | -0,87      | -0,88      | -0,89      | -0,89      |
| <b>16 - YeS</b>    | 0,00     | -0,22     | -0,31     | -0,36     | -0,40      | -0,43      | -0,45      | -0,47      | -0,49      | -0,51      | -0,52      | -0,53      | -0,54      | -0,55      | -0,56      | -0,57      | -0,58      | -0,59      | -0,60      | -0,61      | -0,61      | -0,62      | -0,62      | -0,63      | -0,64      |
| <b>17 - YeS</b>    | 0,00     | -0,29     | -0,38     | -0,44     | -0,47      | -0,50      | -0,53      | -0,55      | -0,57      | -0,58      | -0,60      | -0,61      | -0,62      | -0,63      | -0,64      | -0,65      | -0,66      | -0,67      | -0,67      | -0,68      | -0,69      | -0,69      | -0,70      | -0,71      | -0,71      |
| <b>18 - YeS</b>    | 0,00     | -0,35     | -0,48     | -0,55     | -0,61      | -0,65      | -0,68      | -0,71      | -0,74      | -0,76      | -0,78      | -0,80      | -0,82      | -0,83      | -0,84      | -0,86      | -0,87      | -0,88      | -0,89      | -0,90      | -0,91      | -0,92      | -0,93      | -0,94      | -0,95      |
| <b>19 - YeS</b>    | 0,00     | -0,36     | -0,50     | -0,58     | -0,63      | -0,67      | -0,71      | -0,74      | -0,76      | -0,79      | -0,81      | -0,82      | -0,84      | -0,86      | -0,87      | -0,88      | -0,90      | -0,91      | -0,92      | -0,93      | -0,94      | -0,95      | -0,96      | -0,97      | -0,97      |
| <b>20 - YeS</b>    | 0,00     | -0,30     | -0,45     | -0,53     | -0,59      | -0,64      | -0,68      | -0,71      | -0,74      | -0,77      | -0,79      | -0,81      | -0,83      | -0,84      | -0,86      | -0,87      | -0,89      | -0,90      | -0,91      | -0,92      | -0,93      | -0,94      | -0,95      | -0,96      | -0,97      |
| <b>21 - YeS</b>    | 0,00     | -0,40     | -0,50     | -0,56     | -0,60      | -0,64      | -0,66      | -0,69      | -0,71      | -0,73      | -0,74      | -0,76      | -0,77      | -0,78      | -0,79      | -0,80      | -0,81      | -0,82      | -0,83      | -0,84      | -0,85      | -0,85      | -0,86      | -0,87      | -0,87      |
| <b>22 - YeS</b>    | 0,00     | -0,60     | -0,75     | -0,84     | -0,90      | -0,95      | -0,98      | -1,02      | -1,04      | -1,07      | -1,09      | -1,11      | -1,13      | -1,15      | -1,16      | -1,18      | -1,19      | -1,20      | -1,22      | -1,23      | -1,24      | -1,25      | -1,26      | -1,27      | -1,28      |
| <b>23 - YeS</b>    | 0,00     | -0,90     | -1,12     | -1,25     | -1,34      | -1,41      | -1,47      | -1,51      | -1,56      | -1,59      | -1,63      | -1,66      | -1,69      | -1,71      | -1,74      | -1,76      | -1,78      | -1,80      | -1,82      | -1,83      | -1,85      | -1,86      | -1,88      | -1,89      | -1,91      |
| <b>24 - YeS</b>    | 0,00     | -1,14     | -1,39     | -1,54     | -1,65      | -1,73      | -1,80      | -1,85      | -1,90      | -1,95      | -1,99      | -2,02      | -2,05      | -2,08      | -2,11      | -2,14      | -2,16      | -2,18      | -2,20      | -2,22      | -2,24      | -2,26      | -2,28      | -2,29      | -2,31      |
| <b>25 - YeS</b>    | 0,00     | -0,48     | -0,61     | -0,69     | -0,74      | -0,78      | -0,82      | -0,85      | -0,87      | -0,90      | -0,91      | -0,93      | -0,95      | -0,96      | -0,98      | -0,99      | -1,00      | -1,01      | -1,02      | -1,03      | -1,04      | -1,05      | -1,06      | -1,07      | -1,08      |
| <b>26 - YeS</b>    | 0,00     | -0,21     | -0,30     | -0,36     | -0,40      | -0,43      | -0,46      | -0,48      | -0,49      | -0,51      | -0,53      | -0,54      | -0,55      | -0,56      | -0,57      | -0,58      | -0,59      | -0,60      | -0,61      | -0,61      | -0,62      | -0,63      | -0,63      | -0,64      | -0,65      |
| <b>27 - YeS</b>    | 0,00     | -0,51     | -0,63     | -0,71     | -0,76      | -0,80      | -0,83      | -0,86      | -0,88      | -0,90      | -0,92      | -0,94      | -0,96      | -0,97      | -0,98      | -1,00      | -1,01      | -1,02      | -1,03      | -1,04      | -1,05      | -1,06      | -1,07      | -1,07      | -1,08      |
| <b>28 - YeS</b>    | 0,00     | -0,55     | -0,70     | -0,78     | -0,84      | -0,89      | -0,93      | -0,96      | -0,99      | -1,01      | -1,04      | -1,06      | -1,08      | -1,09      | -1,11      | -1,12      | -1,14      | -1,15      | -1,16      | -1,17      | -1,18      | -1,19      | -1,20      | -1,21      | -1,22      |
| <b>29 - YeS</b>    | 0,00     | -0,30     | -0,39     | -0,44     | -0,48      | -0,50      | -0,53      | -0,54      | -0,56      | -0,58      | -0,59      | -0,60      | -0,61      | -0,62      | -0,63      | -0,64      | -0,65      | -0,65      | -0,66      | -0,67      | -0,67      | -0,68      | -0,69      | -0,69      | -0,70      |
| <b>30 - YeS</b>    | 0,00     | -0,21     | -0,27     | -0,30     | -0,32      | -0,34      | -0,35      | -0,36      | -0,37      | -0,38      | -0,39      | -0,40      | -0,40      | -0,41      | -0,42      | -0,42      | -0,43      | -0,43      | -0,44      | -0,44      | -0,44      | -0,45      | -0,45      | -0,45      | -0,46      |

# **APÊNDICE VIII – PLANILHAS DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL ASSOCIADA AO MODELO SIMP. DE YEN E SCANLON (1675)**

**- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: TODOS OS SETORES - 360 DIAS**

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 1                | 0,25         | 0,19       |
| 2                | 0,27         | 0,17       |
| 3                | 0,33         | 0,24       |
| 4                | 0,40         | 0,38       |
| 5                | 0,44         | 0,28       |
| 6                | 0,65         | 0,49       |
| 7                | 0,55         | 0,48       |
| 8                | 0,79         | 0,56       |
| 9                | 1,52         | 1,35       |
| 10               | 0,55         | 0,43       |
| 11               | 0,32         | 0,24       |
| 12               | 0,23         | 0,16       |
| 13               | 0,32         | 0,32       |
| 14               | 0,35         | 0,22       |
| 15               | 0,78         | 0,63       |
| 16               | 0,54         | 0,52       |
| 17               | 0,62         | 0,49       |
| 18               | 0,82         | 0,72       |
| 19               | 0,84         | 0,76       |
| 20               | 0,83         | 0,71       |
| 21               | 0,77         | 0,67       |
| 22               | 1,13         | 1,20       |
| 23               | 1,69         | 1,43       |
| 24               | 2,05         | 1,98       |
| 25               | 0,95         | 0,95       |
| 26               | 0,55         | 0,48       |
| 27               | 0,96         | 0,81       |
| 28               | 1,08         | 0,86       |
| 29               | 0,61         | 0,33       |
| 30               | 0,40         | 0,28       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 0,72         | 0,61       | 0,66             |
| Desvio padrão          | 0,43         | 0,43       | 0,30             |
| Variância              | 0,19         | 0,18       | 0,09             |
| Média +2DP             | 1,59         | 1,46       |                  |
| Média -2DP             | -0,15        | -0,24      |                  |

|                |       |                |      |
|----------------|-------|----------------|------|
| Início eixo xx | -0,24 | Fim do eixo xx | 1,59 |
| Pontos         | 30,00 | Incremento (m) | 0,06 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| -0,24          | 0,08         | 0,13       | 0,02             |
| -0,18          | 0,11         | 0,17       | 0,03             |
| -0,11          | 0,15         | 0,22       | 0,05             |
| -0,05          | 0,19         | 0,28       | 0,08             |
| 0,01           | 0,24         | 0,35       | 0,13             |
| 0,08           | 0,31         | 0,43       | 0,20             |
| 0,14           | 0,37         | 0,51       | 0,29             |
| 0,20           | 0,45         | 0,59       | 0,41             |
| 0,26           | 0,53         | 0,67       | 0,55             |
| 0,33           | 0,61         | 0,75       | 0,71             |
| 0,39           | 0,69         | 0,82       | 0,88             |
| 0,45           | 0,76         | 0,88       | 1,03             |
| 0,52           | 0,82         | 0,92       | 1,17             |
| 0,58           | 0,87         | 0,94       | 1,26             |
| 0,64           | 0,90         | 0,94       | 1,31             |
| 0,71           | 0,92         | 0,91       | 1,30             |
| 0,77           | 0,91         | 0,87       | 1,24             |
| 0,83           | 0,89         | 0,82       | 1,13             |
| 0,90           | 0,85         | 0,75       | 0,98             |
| 0,96           | 0,79         | 0,67       | 0,82             |
| 1,02           | 0,72         | 0,59       | 0,66             |
| 1,08           | 0,65         | 0,50       | 0,50             |
| 1,15           | 0,57         | 0,42       | 0,37             |
| 1,21           | 0,49         | 0,35       | 0,26             |
| 1,27           | 0,41         | 0,28       | 0,18             |
| 1,34           | 0,34         | 0,22       | 0,11             |
| 1,40           | 0,27         | 0,17       | 0,07             |
| 1,46           | 0,21         | 0,13       | 0,04             |
| 1,53           | 0,16         | 0,09       | 0,02             |
| 1,59           | 0,12         | 0,07       | 0,01             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| -0,18                  |

- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: TODOS OS SETORES - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 1                | 0,30         | 0,43       |
| 2                | 0,32         | 0,38       |
| 3                | 0,39         | 0,51       |
| 4                | 0,46         | 0,50       |
| 5                | 0,51         | 0,60       |
| 6                | 0,75         | 0,91       |
| 7                | 0,65         | 0,80       |
| 8                | 0,90         | 0,85       |
| 9                | 1,75         | 1,99       |
| 10               | 0,63         | 0,62       |
| 11               | 0,37         | 0,44       |
| 12               | 0,27         | 0,31       |
| 13               | 0,37         | 0,45       |
| 14               | 0,41         | 0,40       |
| 15               | 0,89         | 0,89       |
| 16               | 0,64         | 0,82       |
| 17               | 0,71         | 0,87       |
| 18               | 0,95         | 1,33       |
| 19               | 0,97         | 1,31       |
| 20               | 0,97         | 1,42       |
| 21               | 0,87         | 1,00       |
| 22               | 1,28         | 1,40       |
| 23               | 1,91         | 1,97       |
| 24               | 2,31         | 2,28       |
| 25               | 1,08         | 1,27       |
| 26               | 0,65         | 0,88       |
| 27               | 1,08         | 1,17       |
| 28               | 1,22         | 1,24       |
| 29               | 0,70         | 0,73       |
| 30               | 0,46         | 0,40       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 0,83         | 0,94       | 0,88             |
| Desvio padrão          | 0,49         | 0,51       | 0,35             |
| Variância              | 0,24         | 0,26       | 0,13             |
| Média +2DP             | 1,80         | 1,97       |                  |
| Média -2DP             | -0,15        | -0,09      |                  |

|                |       |                |      |
|----------------|-------|----------------|------|
| Início eixo xx | -0,15 | Fim do eixo xx | 1,97 |
| Pontos         | 30,00 | Incremento (m) | 0,07 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| -0,15          | 0,11         | 0,08       | 0,02             |
| -0,08          | 0,15         | 0,11       | 0,03             |
| -0,01          | 0,19         | 0,14       | 0,05             |
| 0,07           | 0,24         | 0,18       | 0,08             |
| 0,14           | 0,30         | 0,23       | 0,13             |
| 0,21           | 0,37         | 0,29       | 0,19             |
| 0,28           | 0,44         | 0,35       | 0,28             |
| 0,36           | 0,52         | 0,41       | 0,38             |
| 0,43           | 0,59         | 0,48       | 0,51             |
| 0,50           | 0,66         | 0,54       | 0,64             |
| 0,58           | 0,72         | 0,61       | 0,78             |
| 0,65           | 0,76         | 0,66       | 0,91             |
| 0,72           | 0,80         | 0,71       | 1,02             |
| 0,80           | 0,81         | 0,75       | 1,09             |
| 0,87           | 0,81         | 0,77       | 1,12             |
| 0,94           | 0,79         | 0,78       | 1,11             |
| 1,02           | 0,75         | 0,77       | 1,04             |
| 1,09           | 0,70         | 0,74       | 0,94             |
| 1,16           | 0,64         | 0,71       | 0,82             |
| 1,24           | 0,57         | 0,66       | 0,68             |
| 1,31           | 0,50         | 0,60       | 0,54             |
| 1,38           | 0,43         | 0,53       | 0,41             |
| 1,46           | 0,36         | 0,47       | 0,30             |
| 1,53           | 0,29         | 0,40       | 0,21             |
| 1,60           | 0,23         | 0,34       | 0,14             |
| 1,67           | 0,18         | 0,28       | 0,09             |
| 1,75           | 0,14         | 0,22       | 0,06             |
| 1,82           | 0,10         | 0,18       | 0,03             |
| 1,89           | 0,08         | 0,14       | 0,02             |
| 1,97           | 0,05         | 0,10       | 0,01             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| 0,16                   |

- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: SETOR SUDESTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 1                | 0,25         | 0,19       |
| 2                | 0,27         | 0,17       |
| 3                | 0,33         | 0,24       |
| 4                | 0,40         | 0,38       |
| 5                | 0,44         | 0,28       |
| 6                | 0,65         | 0,49       |
| 7                | 0,55         | 0,48       |
| 8                | 0,79         | 0,56       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 0,46         | 0,35       | 0,39             |
| Desvio padrão          | 0,19         | 0,15       | 0,12             |
| Variância              | 0,04         | 0,02       | 0,01             |
| Média +2DP             | 0,84         | 0,65       |                  |
| Média -2DP             | 0,08         | 0,05       |                  |

|                |      |                |      |
|----------------|------|----------------|------|
| Início eixo xx | 0,05 | Fim do eixo xx | 0,84 |
| Pontos         | 8,00 | Incremento (m) | 0,11 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| 0,05           | 0,19         | 0,36       | 0,05             |
| 0,16           | 0,59         | 1,21       | 0,49             |
| 0,27           | 1,29         | 2,33       | 2,03             |
| 0,39           | 1,95         | 2,55       | 3,37             |
| 0,50           | 2,06         | 1,60       | 2,23             |
| 0,61           | 1,52         | 0,57       | 0,59             |
| 0,73           | 0,79         | 0,12       | 0,06             |
| 0,84           | 0,28         | 0,01       | 0,00             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| -0,46                  |

- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: SETOR SUDESTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 1                | 0,30         | 0,43       |
| 2                | 0,32         | 0,38       |
| 3                | 0,39         | 0,51       |
| 4                | 0,46         | 0,50       |
| 5                | 0,51         | 0,60       |
| 6                | 0,75         | 0,91       |
| 7                | 0,65         | 0,80       |
| 8                | 0,90         | 0,85       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 0,53         | 0,62       | 0,58             |
| Desvio padrão          | 0,21         | 0,20       | 0,15             |
| Variância              | 0,05         | 0,04       | 0,02             |
| Média +2DP             | 0,96         | 1,03       |                  |
| Média -2DP             | 0,11         | 0,21       |                  |

|                |      |                |      |
|----------------|------|----------------|------|
| Início eixo xx | 0,11 | Fim do eixo xx | 1,03 |
| Pontos         | 8,00 | Incremento (m) | 0,13 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| 0,11           | 0,25         | 0,08       | 0,02             |
| 0,24           | 0,71         | 0,33       | 0,18             |
| 0,37           | 1,38         | 0,91       | 0,97             |
| 0,50           | 1,84         | 1,65       | 2,34             |
| 0,63           | 1,68         | 1,96       | 2,54             |
| 0,76           | 1,05         | 1,53       | 1,24             |
| 0,90           | 0,45         | 0,79       | 0,27             |
| 1,03           | 0,13         | 0,27       | 0,03             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| 0,29                   |

- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: SETOR SUDOESTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 9                | 1,52         | 1,35       |
| 10               | 0,55         | 0,43       |
| 11               | 0,32         | 0,24       |
| 12               | 0,23         | 0,16       |
| 13               | 0,32         | 0,32       |
| 14               | 0,35         | 0,22       |
| 15               | 0,78         | 0,63       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 0,58         | 0,48       | 0,53             |
| Desvio padrão          | 0,45         | 0,42       | 0,31             |
| Variância              | 0,21         | 0,17       | 0,09             |
| Média +2DP             | 1,49         | 1,31       |                  |
| Média -2DP             | -0,32        | -0,35      |                  |

|                |       |                |      |
|----------------|-------|----------------|------|
| Início eixo xx | -0,35 | Fim do eixo xx | 1,49 |
| Pontos         | 7,00  | Incremento (m) | 0,31 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| -0,35          | 0,10         | 0,13       | 0,02             |
| -0,05          | 0,33         | 0,43       | 0,23             |
| 0,26           | 0,68         | 0,84       | 0,90             |
| 0,57           | 0,88         | 0,94       | 1,29             |
| 0,88           | 0,71         | 0,61       | 0,68             |
| 1,18           | 0,37         | 0,23       | 0,13             |
| 1,49           | 0,12         | 0,05       | 0,01             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| -0,17                  |



- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: SETOR SUDOESTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 9                | 1,75         | 1,99       |
| 10               | 0,63         | 0,62       |
| 11               | 0,37         | 0,44       |
| 12               | 0,27         | 0,31       |
| 13               | 0,37         | 0,45       |
| 14               | 0,41         | 0,40       |
| 15               | 0,89         | 0,89       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 0,67         | 0,73       | 0,70             |
| Desvio padrão          | 0,52         | 0,59       | 0,39             |
| Variância              | 0,27         | 0,34       | 0,15             |
| Média +2DP             | 1,71         | 1,90       |                  |
| Média -2DP             | -0,37        | -0,45      |                  |

|                |       |                |      |
|----------------|-------|----------------|------|
| Início eixo xx | -0,45 | Fim do eixo xx | 1,90 |
| Pontos         | 7,00  | Incremento (m) | 0,39 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| -0,45          | 0,08         | 0,09       | 0,01             |
| -0,05          | 0,29         | 0,28       | 0,16             |
| 0,34           | 0,62         | 0,54       | 0,67             |
| 0,73           | 0,76         | 0,68       | 1,02             |
| 1,12           | 0,53         | 0,54       | 0,57             |
| 1,51           | 0,21         | 0,28       | 0,12             |
| 1,90           | 0,05         | 0,09       | 0,01             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| 0,07                   |

- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: SETOR NORTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 16               | 0,54         | 0,52       |
| 17               | 0,62         | 0,49       |
| 18               | 0,82         | 0,72       |
| 19               | 0,84         | 0,76       |
| 20               | 0,83         | 0,71       |
| 21               | 0,77         | 0,67       |
| 22               | 1,13         | 1,20       |
| 23               | 1,69         | 1,43       |
| 24               | 2,05         | 1,98       |
| 25               | 0,95         | 0,95       |
| 26               | 0,55         | 0,48       |
| 27               | 0,96         | 0,81       |
| 28               | 1,08         | 0,86       |
| 29               | 0,61         | 0,33       |
| 30               | 0,40         | 0,28       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 0,92         | 0,81       | 0,87             |
| Desvio padrão          | 0,44         | 0,44       | 0,31             |
| Variância              | 0,19         | 0,20       | 0,10             |
| Média +2DP             | 1,80         | 1,70       |                  |
| Média -2DP             | 0,04         | -0,08      |                  |

|                |       |                |      |
|----------------|-------|----------------|------|
| Início eixo xx | -0,08 | Fim do eixo xx | 1,80 |
| Pontos         | 15,00 | Incremento (m) | 0,13 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| -0,08          | 0,07         | 0,12       | 0,01             |
| 0,06           | 0,13         | 0,21       | 0,04             |
| 0,19           | 0,23         | 0,34       | 0,12             |
| 0,33           | 0,36         | 0,49       | 0,28             |
| 0,46           | 0,52         | 0,66       | 0,55             |
| 0,59           | 0,69         | 0,80       | 0,87             |
| 0,73           | 0,82         | 0,88       | 1,15             |
| 0,86           | 0,90         | 0,89       | 1,27             |
| 1,00           | 0,89         | 0,82       | 1,17             |
| 1,13           | 0,81         | 0,69       | 0,89             |
| 1,27           | 0,67         | 0,53       | 0,57             |
| 1,40           | 0,50         | 0,37       | 0,30             |
| 1,53           | 0,34         | 0,24       | 0,13             |
| 1,67           | 0,22         | 0,14       | 0,05             |
| 1,80           | 0,12         | 0,07       | 0,01             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| -0,18                  |

- DISTRIBUIÇÃO NORMAL: SETOR NORTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| MS               | A priori (m) | Veros. (m) |
| 16               | 0,64         | 0,82       |
| 17               | 0,71         | 0,87       |
| 18               | 0,95         | 1,33       |
| 19               | 0,97         | 1,31       |
| 20               | 0,97         | 1,42       |
| 21               | 0,87         | 1,00       |
| 22               | 1,28         | 1,40       |
| 23               | 1,91         | 1,97       |
| 24               | 2,31         | 2,28       |
| 25               | 1,08         | 1,27       |
| 26               | 0,65         | 0,88       |
| 27               | 1,08         | 1,17       |
| 28               | 1,22         | 1,24       |
| 29               | 0,70         | 0,73       |
| 30               | 0,46         | 0,40       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |              |            |                  |
|------------------------|--------------|------------|------------------|
|                        | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| Média                  | 1,05         | 1,21       | 1,13             |
| Desvio padrão          | 0,49         | 0,47       | 0,34             |
| Variância              | 0,24         | 0,22       | 0,12             |
| Média +2DP             | 2,04         | 2,15       |                  |
| Média -2DP             | 0,07         | 0,26       |                  |

|                |       |                |      |
|----------------|-------|----------------|------|
| Início eixo xx | 0,07  | Fim do eixo xx | 2,15 |
| Pontos         | 15,00 | Incremento (m) | 0,15 |

| DADOS DE SAÍDA |              |            |                  |
|----------------|--------------|------------|------------------|
| Recalque (m)   | A priori (m) | Veros. (m) | A posteriori (m) |
| 0,07           | 0,11         | 0,05       | 0,01             |
| 0,22           | 0,19         | 0,10       | 0,03             |
| 0,37           | 0,31         | 0,18       | 0,09             |
| 0,52           | 0,45         | 0,29       | 0,23             |
| 0,66           | 0,59         | 0,44       | 0,46             |
| 0,81           | 0,72         | 0,60       | 0,76             |
| 0,96           | 0,80         | 0,74       | 1,03             |
| 1,11           | 0,81         | 0,83       | 1,17             |
| 1,26           | 0,74         | 0,84       | 1,09             |
| 1,41           | 0,62         | 0,77       | 0,84             |
| 1,56           | 0,48         | 0,64       | 0,54             |
| 1,71           | 0,33         | 0,48       | 0,28             |
| 1,86           | 0,21         | 0,33       | 0,12             |
| 2,00           | 0,12         | 0,20       | 0,04             |
| 2,15           | 0,07         | 0,11       | 0,01             |

|                        |
|------------------------|
| Indicador de Falha "D" |
| 0,23                   |

# APÊNDICE IX – PLANILHAS DE CONSTRUÇÃO DOS HISTOGRAMAS ASSOCIADOS AO MODELO SIMP. DE YEN E SCANLON (1975)

- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - TODOS OS SETORES - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,19       | 0,13       |
| 2                | 0,17       | 0,17       |
| 3                | 0,24       | 0,22       |
| 4                | 0,38       | 0,28       |
| 5                | 0,28       | 0,35       |
| 6                | 0,49       | 0,43       |
| 7                | 0,48       | 0,51       |
| 8                | 0,56       | 0,59       |
| 9                | 1,35       | 0,67       |
| 10               | 0,43       | 0,75       |
| 11               | 0,24       | 0,82       |
| 12               | 0,16       | 0,88       |
| 13               | 0,32       | 0,92       |
| 14               | 0,22       | 0,94       |
| 15               | 0,63       | 0,94       |
| 16               | 0,52       | 0,91       |
| 17               | 0,49       | 0,87       |
| 18               | 0,72       | 0,82       |
| 19               | 0,76       | 0,75       |
| 20               | 0,71       | 0,67       |
| 21               | 0,67       | 0,59       |
| 22               | 1,20       | 0,50       |
| 23               | 1,43       | 0,42       |
| 24               | 1,98       | 0,35       |
| 25               | 0,95       | 0,28       |
| 26               | 0,48       | 0,22       |
| 27               | 0,81       | 0,17       |
| 28               | 0,86       | 0,13       |
| 29               | 0,33       | 0,09       |
| 30               | 0,28       | 0,07       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,16 | Classes        | 5,00 |
| Máximo (m)             | 1,98 | Incremento (m) | 0,36 |
| Média (m)              | 0,61 | Desv. Pad. (m) | 0,43 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,53      | 56,67          |
| 2,00           | 0,89      | 26,67          |
| 3,00           | 1,25      | 6,67           |
| 4,00           | 1,61      | 6,67           |
| 5,00           | 1,98      | 3,33           |
|                |           | 0,00           |

- HISTOGRAMA: A PRIORI - TODOS OS SETORES - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,25      | 0,08       |
| 2                | 0,27      | 0,11       |
| 3                | 0,33      | 0,15       |
| 4                | 0,40      | 0,19       |
| 5                | 0,44      | 0,24       |
| 6                | 0,65      | 0,31       |
| 7                | 0,55      | 0,37       |
| 8                | 0,79      | 0,45       |
| 9                | 1,52      | 0,53       |
| 10               | 0,55      | 0,61       |
| 11               | 0,32      | 0,69       |
| 12               | 0,23      | 0,76       |
| 13               | 0,32      | 0,82       |
| 14               | 0,35      | 0,87       |
| 15               | 0,78      | 0,90       |
| 16               | 0,54      | 0,92       |
| 17               | 0,62      | 0,91       |
| 18               | 0,82      | 0,89       |
| 19               | 0,84      | 0,85       |
| 20               | 0,83      | 0,79       |
| 21               | 0,77      | 0,72       |
| 22               | 1,13      | 0,65       |
| 23               | 1,69      | 0,57       |
| 24               | 2,05      | 0,49       |
| 25               | 0,95      | 0,41       |
| 26               | 0,55      | 0,34       |
| 27               | 0,96      | 0,27       |
| 28               | 1,08      | 0,21       |
| 29               | 0,61      | 0,16       |
| 30               | 0,40      | 0,12       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,23 | Classes        | 5,00 |
| Máximo (m)             | 2,05 | Incremento (m) | 0,36 |
| Média (m)              | 0,72 | Desv. Pad. (m) | 0,43 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,60      | 46,67          |
| 2,00           | 0,96      | 36,67          |
| 3,00           | 1,32      | 6,67           |
| 4,00           | 1,69      | 6,67           |
| 5,00           | 2,09      | 3,33           |
|                |           | 0,00           |

- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - TODOS OS SETORES - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,43       | 0,08       |
| 2                | 0,38       | 0,11       |
| 3                | 0,51       | 0,14       |
| 4                | 0,50       | 0,18       |
| 5                | 0,60       | 0,23       |
| 6                | 0,91       | 0,29       |
| 7                | 0,80       | 0,35       |
| 8                | 0,85       | 0,41       |
| 9                | 1,99       | 0,48       |
| 10               | 0,62       | 0,54       |
| 11               | 0,44       | 0,61       |
| 12               | 0,31       | 0,66       |
| 13               | 0,45       | 0,71       |
| 14               | 0,40       | 0,75       |
| 15               | 0,89       | 0,77       |
| 16               | 0,82       | 0,78       |
| 17               | 0,87       | 0,77       |
| 18               | 1,33       | 0,74       |
| 19               | 1,31       | 0,71       |
| 20               | 1,42       | 0,66       |
| 21               | 1,00       | 0,60       |
| 22               | 1,40       | 0,53       |
| 23               | 1,97       | 0,47       |
| 24               | 2,28       | 0,40       |
| 25               | 1,27       | 0,34       |
| 26               | 0,88       | 0,28       |
| 27               | 1,17       | 0,22       |
| 28               | 1,24       | 0,18       |
| 29               | 0,73       | 0,14       |
| 30               | 0,40       | 0,10       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,31 | Classes        | 5,00 |
| Máximo (m)             | 2,28 | Incremento (m) | 0,40 |
| Média (m)              | 0,94 | Desv. Pad. (m) | 0,51 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,70      | 36,67          |
| 2,00           | 1,10      | 30,00          |
| 3,00           | 1,49      | 23,33          |
| 4,00           | 1,89      | 0,00           |
| 5,00           | 2,28      | 10,00          |
|                |           | 0,00           |

- HISTOGRAMA: A PRIORI - TODOS OS SETORES - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,30      | 0,11       |
| 2                | 0,32      | 0,15       |
| 3                | 0,39      | 0,19       |
| 4                | 0,46      | 0,24       |
| 5                | 0,51      | 0,30       |
| 6                | 0,75      | 0,37       |
| 7                | 0,65      | 0,44       |
| 8                | 0,90      | 0,52       |
| 9                | 1,75      | 0,59       |
| 10               | 0,63      | 0,66       |
| 11               | 0,37      | 0,72       |
| 12               | 0,27      | 0,76       |
| 13               | 0,37      | 0,80       |
| 14               | 0,41      | 0,81       |
| 15               | 0,89      | 0,81       |
| 16               | 0,64      | 0,79       |
| 17               | 0,71      | 0,75       |
| 18               | 0,95      | 0,70       |
| 19               | 0,97      | 0,64       |
| 20               | 0,97      | 0,57       |
| 21               | 0,87      | 0,50       |
| 22               | 1,28      | 0,43       |
| 23               | 1,91      | 0,36       |
| 24               | 2,31      | 0,29       |
| 25               | 1,08      | 0,23       |
| 26               | 0,65      | 0,18       |
| 27               | 1,08      | 0,14       |
| 28               | 1,22      | 0,10       |
| 29               | 0,70      | 0,08       |
| 30               | 0,46      | 0,05       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,27 | Classes        | 5,00 |
| Máximo (m)             | 2,31 | Incremento (m) | 0,41 |
| Média (m)              | 0,83 | Desv. Pad. (m) | 0,49 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,68      | 46,67          |
| 2,00           | 1,08      | 36,67          |
| 3,00           | 1,49      | 6,67           |
| 4,00           | 1,90      | 3,33           |
| 5,00           | 2,31      | 3,33           |
|                |           | 0,00           |

- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - SETOR SUDESTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,19       | 0,36       |
| 2                | 0,17       | 1,21       |
| 3                | 0,24       | 2,33       |
| 4                | 0,38       | 2,55       |
| 5                | 0,28       | 1,60       |
| 6                | 0,49       | 0,57       |
| 7                | 0,48       | 0,12       |
| 8                | 0,56       | 0,01       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,17 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 0,56 | Incremento (m) | 0,13 |
| Média (m)              | 0,35 | Desv. Pad. (m) | 0,15 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,30      | 50,00          |
| 2,00           | 0,43      | 12,50          |
| 3,00           | 0,57      | 37,50          |

0,00



- HISTOGRAMA: A PRIORI - SETOR SUDESTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,25      | 0,19       |
| 2                | 0,27      | 0,59       |
| 3                | 0,33      | 1,29       |
| 4                | 0,40      | 1,95       |
| 5                | 0,44      | 2,06       |
| 6                | 0,65      | 1,52       |
| 7                | 0,55      | 0,79       |
| 8                | 0,79      | 0,28       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,25 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 0,79 | Incremento (m) | 0,18 |
| Média (m)              | 0,46 | Desv. Pad. (m) | 0,19 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,43      | 50,00          |
| 2,00           | 0,61      | 25,00          |
| 3,00           | 0,79      | 25,00          |

0,00

- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - SETOR SUDESTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,43       | 0,08       |
| 2                | 0,38       | 0,33       |
| 3                | 0,51       | 0,91       |
| 4                | 0,50       | 1,65       |
| 5                | 0,60       | 1,96       |
| 6                | 0,91       | 1,53       |
| 7                | 0,80       | 0,79       |
| 8                | 0,85       | 0,27       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,38 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 0,91 | Incremento (m) | 0,18 |
| Média (m)              | 0,62 | Desv. Pad. (m) | 0,20 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,56      | 50,00          |
| 2,00           | 0,73      | 12,50          |
| 3,00           | 0,91      | 37,50          |

0,00

- HISTOGRAMA: A PRIORI - SETOR SUDESTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 1                | 0,30      | 0,25       |
| 2                | 0,32      | 0,71       |
| 3                | 0,39      | 1,38       |
| 4                | 0,46      | 1,84       |
| 5                | 0,51      | 1,68       |
| 6                | 0,75      | 1,05       |
| 7                | 0,65      | 0,45       |
| 8                | 0,90      | 0,13       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,30 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 0,90 | Incremento (m) | 0,20 |
| Média (m)              | 0,53 | Desv. Pad. (m) | 0,21 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,50      | 50,00          |
| 2,00           | 0,70      | 25,00          |
| 3,00           | 0,90      | 25,00          |

0,00

- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - SETOR SUDOESTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 9                | 1,35       | 0,13       |
| 10               | 0,43       | 0,43       |
| 11               | 0,24       | 0,84       |
| 12               | 0,16       | 0,94       |
| 13               | 0,32       | 0,61       |
| 14               | 0,22       | 0,23       |
| 15               | 0,63       | 0,05       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,16 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 1,35 | Incremento (m) | 0,40 |
| Média (m)              | 0,48 | Desv. Pad. (m) | 0,42 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,56      | 71,43          |
| 2,00           | 0,95      | 14,29          |
| 3,00           | 1,35      | 14,29          |

0,00

- HISTOGRAMA: A PRIORI - SETOR SUDOESTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 9                | 1,52      | 0,10       |
| 10               | 0,55      | 0,33       |
| 11               | 0,32      | 0,68       |
| 12               | 0,23      | 0,88       |
| 13               | 0,32      | 0,71       |
| 14               | 0,35      | 0,37       |
| 15               | 0,78      | 0,12       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,23 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 1,52 | Incremento (m) | 0,43 |
| Média (m)              | 0,58 | Desv. Pad. (m) | 0,45 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,56      | 71,43          |
| 2,00           | 0,95      | 14,29          |
| 3,00           | 1,35      | 14,29          |

0,00

- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - SETOR SUDOESTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 9                | 1,99       | 0,09       |
| 10               | 0,62       | 0,28       |
| 11               | 0,44       | 0,54       |
| 12               | 0,31       | 0,68       |
| 13               | 0,45       | 0,54       |
| 14               | 0,40       | 0,28       |
| 15               | 0,89       | 0,09       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,31 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 1,99 | Incremento (m) | 0,56 |
| Média (m)              | 0,73 | Desv. Pad. (m) | 0,59 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,87      | 71,43          |
| 2,00           | 1,43      | 14,29          |
| 3,00           | 1,99      | 14,29          |

0,00

- HISTOGRAMA: A PRIORI - SETOR SUDOESTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 9                | 1,75      | 0,08       |
| 10               | 0,63      | 0,29       |
| 11               | 0,37      | 0,62       |
| 12               | 0,27      | 0,76       |
| 13               | 0,37      | 0,53       |
| 14               | 0,41      | 0,21       |
| 15               | 0,89      | 0,05       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,27 | Classes        | 3,00 |
| Máximo (m)             | 1,75 | Incremento (m) | 0,50 |
| Média (m)              | 0,67 | Desv. Pad. (m) | 0,52 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,76      | 71,43          |
| 2,00           | 1,26      | 14,29          |
| 3,00           | 1,76      | 14,29          |

0,00

- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - SETOR NORTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 16               | 0,52       | 0,12       |
| 17               | 0,49       | 0,21       |
| 18               | 0,72       | 0,34       |
| 19               | 0,76       | 0,49       |
| 20               | 0,71       | 0,66       |
| 21               | 0,67       | 0,80       |
| 22               | 1,20       | 0,88       |
| 23               | 1,43       | 0,89       |
| 24               | 1,98       | 0,82       |
| 25               | 0,95       | 0,69       |
| 26               | 0,48       | 0,53       |
| 27               | 0,81       | 0,37       |
| 28               | 0,86       | 0,24       |
| 29               | 0,33       | 0,14       |
| 30               | 0,28       | 0,07       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,28 | Classes        | 4,00 |
| Máximo (m)             | 1,98 | Incremento (m) | 0,42 |
| Média (m)              | 0,81 | Desv. Pad. (m) | 0,44 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,70      | 40,00          |
| 2,00           | 1,13      | 40,00          |
| 3,00           | 1,55      | 13,33          |
| 4,00           | 1,98      | 6,67           |
|                |           | 0,00           |



- HISTOGRAMA: A PRIORI - SETOR NORTE - 360 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 16               | 0,54      | 0,07       |
| 17               | 0,62      | 0,13       |
| 18               | 0,82      | 0,23       |
| 19               | 0,84      | 0,36       |
| 20               | 0,83      | 0,52       |
| 21               | 0,77      | 0,69       |
| 22               | 1,13      | 0,82       |
| 23               | 1,69      | 0,90       |
| 24               | 2,05      | 0,89       |
| 25               | 0,95      | 0,81       |
| 26               | 0,55      | 0,67       |
| 27               | 0,96      | 0,50       |
| 28               | 1,08      | 0,34       |
| 29               | 0,61      | 0,22       |
| 30               | 0,40      | 0,12       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,40 | Classes        | 4,00 |
| Máximo (m)             | 2,05 | Incremento (m) | 0,41 |
| Média (m)              | 0,92 | Desv. Pad. (m) | 0,44 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,82      | 46,67          |
| 2,00           | 1,23      | 40,00          |
| 3,00           | 1,64      | 0,00           |
| 4,00           | 2,06      | 13,33          |
|                |           | 0,00           |

- HISTOGRAMA: VEROSSIMILHANÇA - SETOR NORTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |            |            |
|------------------|------------|------------|
| MS               | Medido (m) | Normal (m) |
| 16               | 0,82       | 0,05       |
| 17               | 0,87       | 0,10       |
| 18               | 1,33       | 0,18       |
| 19               | 1,31       | 0,29       |
| 20               | 1,42       | 0,44       |
| 21               | 1,00       | 0,60       |
| 22               | 1,40       | 0,74       |
| 23               | 1,97       | 0,83       |
| 24               | 2,28       | 0,84       |
| 25               | 1,27       | 0,77       |
| 26               | 0,88       | 0,64       |
| 27               | 1,17       | 0,48       |
| 28               | 1,24       | 0,33       |
| 29               | 0,73       | 0,20       |
| 30               | 0,40       | 0,11       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,40 | Classes        | 4,00 |
| Máximo (m)             | 2,28 | Incremento (m) | 0,47 |
| Média (m)              | 1,21 | Desv. Pad. (m) | 0,47 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,87      | 26,67          |
| 2,00           | 1,34      | 46,67          |
| 3,00           | 1,81      | 13,33          |
| 4,00           | 2,28      | 13,33          |
|                |           | 0,00           |

- HISTOGRAMA: A PRIORI - SETOR NORTE - 720 DIAS

| DADOS DE ENTRADA |           |            |
|------------------|-----------|------------|
| MS               | Calc. (m) | Normal (m) |
| 16               | 0,64      | 0,11       |
| 17               | 0,71      | 0,19       |
| 18               | 0,95      | 0,31       |
| 19               | 0,97      | 0,45       |
| 20               | 0,97      | 0,59       |
| 21               | 0,87      | 0,72       |
| 22               | 1,28      | 0,80       |
| 23               | 1,91      | 0,81       |
| 24               | 2,31      | 0,74       |
| 25               | 1,08      | 0,62       |
| 26               | 0,65      | 0,48       |
| 27               | 1,08      | 0,33       |
| 28               | 1,22      | 0,21       |
| 29               | 0,70      | 0,12       |
| 30               | 0,46      | 0,07       |

| CÁLCULO DOS PARÂMETROS |      |                |      |
|------------------------|------|----------------|------|
| Mínimo (m)             | 0,46 | Classes        | 4,00 |
| Máximo (m)             | 2,31 | Incremento (m) | 0,46 |
| Média (m)              | 1,05 | Desv. Pad. (m) | 0,49 |

| DADOS DE SAÍDA |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| Classes        | Corte (m) | Frequência (%) |
| 1,00           | 0,92      | 40,00          |
| 2,00           | 1,38      | 46,67          |
| 3,00           | 1,85      | 0,00           |
| 4,00           | 2,31      | 13,33          |
|                |           | 0,00           |

## APÊNDICE X – AVALIAÇÃO DA QUALIFICAÇÃO

Após apresentação prévia do conteúdo desenvolvido para a tese até então em elaboração, no dia 30/08/2023, feita pelo candidato Thiago Souza Ornelas Moraes, com duração de 30 minutos, a banca examinadora teceu alguns comentários que podem ser observados em transcrição a seguir:

**A – Alessandra Freitas**

**B – Bernadete Danziger**

**M - Marcus Pacheco**

**T – Thiago Ornelas**

**M:**

Gostei muito. Fiquei muito satisfeito com a apresentação e com a demonstração de segurança ao longo dela;

O candidato demonstrou ter conhecimento e compreendeu bem a ferramenta;

Aproveitou bem a possibilidade de aplicação da Teoria de Bayes;

Ressalto a importância de se atentar ao tempo, pois precisou de um sinal da prof. Bernadete para o candidato ganhar maior velocidade e conseguir concluir no tempo adequado. Todos fazemos apresentações, controle do tempo é essencial, procurar ser sucinto e objetivo;

Destaco também que ficou claro que no início você leu parte de um texto, e depois prosseguiu seguramente sem ler. O candidato não deve nunca ler. Essa é uma dica para impressionar a plateia.

Pergunto: Gostaria de localizar melhor geograficamente o local do estudo de caso. É importante saber que região estamos analisando.

*(Citando alguns exemplos de ocorrências em empreendimentos devido ao perfil estratigráfico da região, em especial com existência de solo colapsável)*

**T:**

*(Retornando à apresentação e indicando a informação)*

Jaboatão dos Guararapes, Região Metropolitana de Recife - Pernambuco.

**M:**

Não tinha atentado para a descrição do local na apresentação. Está ótimo, obrigado; Me sinto confortável em resolver problemas do setor que foi apresentado, porque o trabalho fornece detalhes e valores típicos de forma cuidadosa;

Pergunto: Por que não foi falado sobre a fundação do aterro? Não é importante no estudo?

**T:**

Conforme melhor detalhado no documento escrito, trata-se de um solo residual na fundação, com características geotecnicamente favoráveis, confirmadas por trincheiras e sondagens realizadas pela operação do empreendimento, por isso o recalque se torna desprezível em relação ao recalque dos resíduos.

**M:**

*(Satisfeito com a resposta apresentada)*

Muito bom. Fiquei surpreso com a uniformidade dos resultados para valores tão heterogêneos. Dispersão menor do que o esperado. Impressionado com curvas muito coerentes. Onde se esperaria haver mais incertezas. Isso não ocorre usualmente, em problemas de adensamento, quanto mais se introduz parâmetros, maior incerteza. No entanto, sabe-se que com bons parâmetros, métodos de previsão se aproximam de dados medidos. *A priori*, já se sabia os resultados, então resultados teóricos se aproximam dos medidos.

**A:**

A não consideração do recalque da fundação justifica-se pelo fato de, em geral, a magnitude do recalque do lixo ser muito maior, e a fundação não causar interferência significativa nesse resultado, embora pudesse ser feita uma estimativa e mostrar a diferença pequena;

O índice de boa qualidade dos ajustes se deve à consideração *a priori*, pois um dos parâmetros que o Thiago utilizou, ele calibrou antes no modelo. Além do banco ter sido separado por regiões representativas.

**M:**

Seria interessante fazer um apontamento sobre o efeito da separação por regiões e da calibração do modelo. Inclusive, isso ilustra e reforça como a presença do monitoramento resulta na redução de incertezas;

Não pode tomar decisão sobre capacidade de carga sem análise estabilidade, vide acidente a meia encosta no Morro do Bumba, que aconteceu em Niterói. Enfim, no caso analisado é diferente, não tem o foco na estabilidade, só nos recalques;

Regiões representativas é o que se faz comumente em fundações, divide-se em áreas com similaridade de comportamento.

**B:**

Destaco a importância de se verificar o tipo de distribuição da função densidade de probabilidade mais adequada, uma vez que verifiquei, nos histogramas, muita diferença. Estranhei que em casos de histogramas simétricos, a curva de Gauss não estava centrada com histograma.

**M:**

Acho que Normal, log normal, Beta, não vai fazer muita diferença. Estatística dos extremos, ainda que não seja nosso caso, quando temos que prever evento extremo, vai divergir muito da estatística de média e desvio padrão.

**B:**

Achava que Lacasse é que tinha chegado àquelas fórmulas da atualização da média e variância.

**M:**

O livro do Ang e Tang, vol. 2, já existem estas equações. O que Lacasse fez foi organizar e divulgar amplamente.

**A:**

Em visita a Aterro de Seropédica, 2 coisas a impressionaram: controle rigoroso dos materiais e pesagem de amostragem do material, com destinos para certo trecho da célula. A pouca variabilidade indicada no trabalho do Thiago talvez reflita a pequena variabilidade decorrente de um processo de controle da disposição de campo que

reduza esta variabilidade. Esta amostragem parece ter importância em Seropédica, separando gás metano, para utilização e lixiviado controlado. Tem a ver com a boa caracterização inicial e o bom controle executivo na execução.

**M:**

Pergunto: Qual foi o tempo máximo de observação das leituras?

**T:**

Neste caso, 2 anos, e se deve aos critérios de conformidade de referência. Devido à questão da dinâmica de disposição, instrumentos que são danificados ou aterrados/sobrepostos e descontinuados.

**M:**

Considero importante o fato de o tempo de observação ser muito curto em função do tempo em que o material levará se deformando. Por amostragem e em função de controle rigoroso de riscos, os valores de cálculo são muito próximos dos medidos no primeiro ano. Como não se tem em campo o secundário, a longo tempo os reais tendem a ser muito maiores que os calculados.

*(Citando exemplos de períodos de cheia em Veneza, da tomada de decisão de uso de fundação direta na orla de Santos e os recalques por superposição de tensões na Av. Pres. Vargas)*

Por fim, concluo que o trabalho é bom quando agrega novidade para o avaliador. Thiago agregou muito. Nossos maiores mestres são os bons alunos. Reuniu maturidade, qualidade e a ajuda da Alessandra que deve ter sido relevante;

Destaco para o Thiago o que eu, como ex-aluno do Barata, escutei muito: estude sempre, e cada vez mais, conhecimento é muito importante e é um bem adquirido para sempre.

**A:**

Uma coisa que senti falta foi um parágrafo sobre questões normativas. Vale a pena inserir para que o leigo tenha conhecimento que existem estes aspectos normativos que norteiam o projeto. Altura e o volume limite das células, proximidade de Aeroportos e áreas urbanas, estabilidade referências, entre outros.

**B:**

Ao deliberarmos, nós avaliadores consideramos o trabalho excelente. Se a banca tivesse que escolher uma nota para o trabalho e defesa da qualificação, os avaliadores consideraram que esta nota seria a MÁXIMA.