

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

TAMIRES PEREIRA RISON

**VALIDAÇÃO DE MODELO ACOPLADO PARA PREVISÃO DE RECALQUES EM
ATERROS SANITÁRIOS**

**ALEGRETE
2021**

TAMIRES PEREIRA RISON

**VALIDAÇÃO DE MODELO ACOPLADO PARA PREVISÃO DE RECALQUES EM
ATERROS SANITÁRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco

**ALEGRETE
2021**

TAMIRES PEREIRA RISON

**VALIDAÇÃO DE MODELO ACOPLADO PARA PREVISÃO DE RECALQUES EM
ATERROS SANITÁRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em, 16 de abril de 2021.
Banca examinadora:

Prof. D.Sc. Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco
Orientador
UNIPAMPA

Prof. D.Sc. Diego Arthur Hartmann
UNIPAMPA

Prof. D.Sc. Rinaldo José Barbosa Pinheiro
UFSM

Dedico este trabalho de conclusão de curso a uma amiga muito querida, que nos deixou no dia 02 de abril deste mesmo ano, em decorrência de complicações devido a Covid-19, que sua memória seja sempre lembrada por nós minha querida, Engenheira Civil Daiana Gonçalves da Silva.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a espiritualidade maior, que me orienta o caminho da existência.

A minha família que me apoia incansavelmente.

Meu noivo Eduardo o qual está ao meu lado nas batalhas dessa existência.

A minha amiga que a UNIPAMPA me apresentou, Gabriella Chagas Kurtz, que me ajudou em um pequeno trecho desse estudo e me presenteia com sua amizade.

E ao professor Wilber, meu orientador, por ter me proporcionado participar desta pesquisa.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo validar um modelo acoplado para previsão de recalques em aterros sanitários. Primeiramente foram escolhidos os aterros sanitários Muribeca e Belo Horizonte. Em seguida foram coletados os dados referentes de cada aterro, tais como condições estruturais e geométricas das células, espessuras das camadas de resíduos sólidos, teor de orgânicos e recalques monitorados. Posteriormente foram aplicados os modelos Tapahuasco (2009), Meruelo (1995) e Bjarngard e Edgers (1990). Os resultados obtidos através da aplicação dos modelos de previsão de recalques foram satisfatórios, validados através da correlação linear, realizada com os métodos de Pearson e Mínimos Quadrados. O modelo de Meruelo obteve melhor desempenho em relação à correlação linear, com média acima de 0,97, o modelo de Tapahuasco obteve média de correlação linear acima de 0,91 e, o modelo de Bjarngard e Edgers apresentou média acima de 0,95. O modelo de Tapahuasco apresentou uma grande versatilidade quando comparado aos demais modelos, possibilitando a estimativa de recalques iniciais não registrados e, prevendo recalques sob efeitos de acréscimos de cargas e biodegradabilidade.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos, compressibilidade, aterro sanitário, biodegradação.

ABSTRACT

This work aims to validate a coupled model for prediction of landfill settlement. Firstly, Muribeca and Belo Horizonte landfills were chosen. Then, data were collected for each landfill, such structural and geometric conditions of the cells, the thickness of layers of solid waste, organic content, and monitored settlements. Subsequently, the Tapahuasco (2009), Meruelo (1995) and Bjarngard and Edgers (1990) models were applied. The results obtained through the application of the settlement prediction models were satisfactory, validated through the linear correlation, made by the Pearson and Least Squares methods. The Meruelo model obtained better performance in relation to the linear correlation, with an average above 0.97, the Tapahuasco model obtained an average linear correlation above 0.91, and the Bjarngard and Edgers model showed an average above 0.95. The Tapahuasco model has great versatility when compared to the other models, making it possible to estimate initial unregistered settlements and, providing for settlements under the effects of increased load and biodegradability.

Keywords: solid urban waste, compressibility, landfill, biodegradation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivo	11
1.1.1 Objetivo Geral	11
1.1.2 Objetivos Específicos	11
1.2 Justificativa.....	11
1.3 Estruturação do Trabalho.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 Aspectos Gerais	13
2.2 Resíduos Sólidos Urbanos e sua disposição	15
2.3 Aterros Sanitários	16
2.4 Compressibilidade e Recalques em Aterros Sanitários	19
2.4.1 Generalidades.....	19
2.4.2 Fatores geradores de recalques	20
2.4.3 Estágios da Compressibilidade	21
2.4.4 Efeito da Biodegradabilidade nos recalques dos RSU	21
2.4.5 Modelos de previsão de recalques	23
2.4.5.1 Modelo de Bjarngard e Edgers (1990)	24
2.4.5.2 Modelo de Meruelo (1995).....	25
2.4.6 Equação Acoplada de Tapahuasco a Validar (2009)	27
3 METODOLOGIA	31
3.1 Compilação de dados de operação e monitoramento dos recalques registrados.....	31
3.1.1 Aterro da Muribeca.....	32
3.1.2 Aterro de Belo Horizonte	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 Registro e interpretação dos recalques monitorados.....	41
4.1.1 Aterro da Muribeca.....	41
4.1.2 Aterro de Belo Horizonte	43
4.2 Aplicação e validação do método Acoplado de Tapahuasco (2009)	45
4.2.1 Aterro da Muribeca.....	45

4.2.2 Aterro de Belo Horizonte	51
4.3 Aplicação modelos de Bjarngard e Edgers (1990) e Meruelo (1995)	59
4.3.1 Aplicação modelo de Bjarngard e Edgers (1990)	59
4.3.1.1 Aterro da Muribeca.....	59
4.3.2.2 Aterro de Belo Horizonte	63
4.3.2 Aplicação modelo de Meruelo (1995).....	67
4.3.2.1 Aterro da Muribeca.....	67
4.3.2.2 Aterro de Belo Horizonte	70
5 ANÁLISE E CORRELAÇÃO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DE RECALQUES	74
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional observado a cada ano, que acarreta em um aumento da demanda por serviços e consumo doméstico, entre outros fatores, contribuem diretamente para o aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). Estes resíduos, muitas vezes descartados de maneira incorreta, geram danos ao meio ambiente, contaminando o solo e as águas subterrâneas e superficiais.

A coleta seletiva, que ainda não é totalmente efetiva no país, é um dos meios de minimizar os danos ao meio ambiente e dar um destino correto aos resíduos. O resíduo coletado que não pode ser reciclado deve ser destinado a aterros sanitários, que são locais adequados para a sua disposição, onde poderão ser coletados e aproveitados os gases gerados. Nos aterros sanitários também são recolhidos os líquidos gerados a partir da decomposição dos materiais depositados nestes aterros. Um aspecto desfavorável dos aterros sanitários é a elevada taxa de deslocamentos verticais do montante, que ocorrem devido à degradação dos materiais neles depositados, devido a isso a estrutura deste sistema não é estável, até passado a fase de biodegradação dos materiais orgânicos neles dispostos e a compactação final de todos os materiais.

O monitoramento dos recalques superficiais nas células de aterros sanitários é de grande relevância, devido à importância de proteger as suas estruturas internas, tais como sistemas de drenagem de gases e drenagem de líquidos percolados. Além disso, permitir a previsão dos recalques em função do tempo, determinando o tempo em que os recalques poderão estabilizar-se, possibilitando aumentar assim, a capacidade de recebimento de RSU, aumentar sua vida útil e, finalmente o encerramento da célula de aterro sanitário.

Para a realização da estimativa dos recalques, são utilizados modelos de previsão, que somados ao histórico de recalques dos aterros, pode auxiliar na identificação do comportamento mecânico destes. Os modelos tradicionais mais utilizados são o Modelo de Sowers (1973), Modelo de Bjarngard & Edgers (1990) e, o Modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998), estes são considerados predominantemente empíricos, pois não se baseiam diretamente nas propriedades mecânicas nem nos fatores que governam as deformações dos maciços de RSU. Dessa forma, destaca-se a importância de desenvolver e contar com métodos de previsão de recalques que permitam estimar deformações verticais de forma mais fiel aos que ocorrem nos

maciços sanitários, levando em consideração os principais fatores que governam e influenciam nessas deformações.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo validar um modelo acoplado para previsão de recalques em aterros sanitários.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para cumprirmos com o objetivo principal serão levados em conta os seguintes objetivos específicos:

- Entender o comportamento dos recalques registrados no aterro da Muribeca e do aterro sanitário de Belo Horizonte, em função do tempo;
- Ajustar e validar as equações propostas por Tapahuasco (2009) a partir da retro análise dos recalques registrados nos aterros de Muribeca e Belo Horizonte;
- Realizar um estudo comparativo de previsão recalques em aterros sanitários utilizando os modelos de ajuste de Tapahuasco (2009), Meruelo (1995) e Bjarngard e Edgers (1990).

1.2 Justificativa

Modelos para previsão de recalques como o de Sowers (1973), modelo de Bjarngard & Edgers (1990), entre outros modelos tradicionais têm como objetivo estimar os recalques que ocorrem nos aterros sanitários e assim estimar sua vida útil, mas estes modelos tradicionais são quase predominantemente empíricos, não levam em consideração as propriedades mecânicas e os fatores que governam as deformações dos maciços de RSU.

Segundo Melo (2003) e Jucá (1999), após o encerramento da disposição dos RSU nos aterros, ocorrem vários processos no interior das células de resíduos, promovendo e aumentando as deformações verticais. Tais deformações são geradas devido ao acréscimo de tensões provocado pela própria sobreposição de camadas de

resíduos. Além disso, a influência da decomposição dos materiais orgânicos, gerando gases que são retirados do interior da célula, originando vazios entre as partículas não decompostas, podem ocasionar um aumento nas deformações verticais.

Dessa maneira destaca-se a importância do aprofundamento de estudos que possibilitem uma melhor precisão de estimativas dos recalques, permitindo assim, ter melhor controle da estabilidade das estruturas internas que compõem os maciços sanitários, possibilitando uma previsão mais precisa da vida útil de operação dos aterros sanitários.

1.3 Estruturação do Trabalho

O presente trabalho está dividido nos seguintes capítulos:

Capítulo 1 – no primeiro capítulo, estão apresentadas a contextualização do tema, objetivo geral e específicos do trabalho e sua justificativa.

Capítulo 2 – mostra-se, nesse capítulo, a revisão bibliográfica sobre os aspectos gerais de aterros sanitários, estrutura e sistema, compressibilidade e recalques em aterros sanitários.

Capítulo 3 – estão expostos no capítulo os materiais e os métodos a ser utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 4 – são citados os resultados alcançados com o desenvolvimento da pesquisa.

Capítulo 5 – é apresentada a análise dos resultados encontrados.

Capítulo 6 – apresenta as considerações finais.

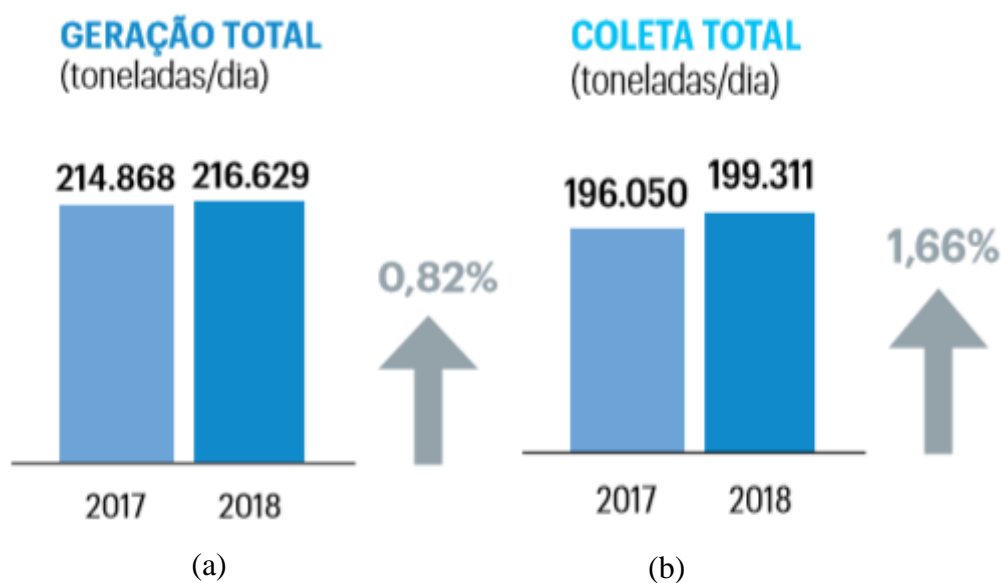
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos Gerais

Segundo a ABRELPE (2018), no Brasil a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) registrou aumento pouco menor que 1% em relação ao ano anterior. A geração total de resíduos aumentou 0,82% e chegou a 216.629 t/dia de RSU gerados no país. O índice de coleta desses resíduos manteve-se em 92%, em relação ao ano anterior que foi de 90%.

Na Figura 1 (a) observa-se o aumento de 0,82% na geração total de RSU em toneladas por dia entre os anos de 2017 e 2018, e na Figura 1 (b) observamos que houve um aumento também na coleta total de RSU com uma porcentagem de 1,66%.

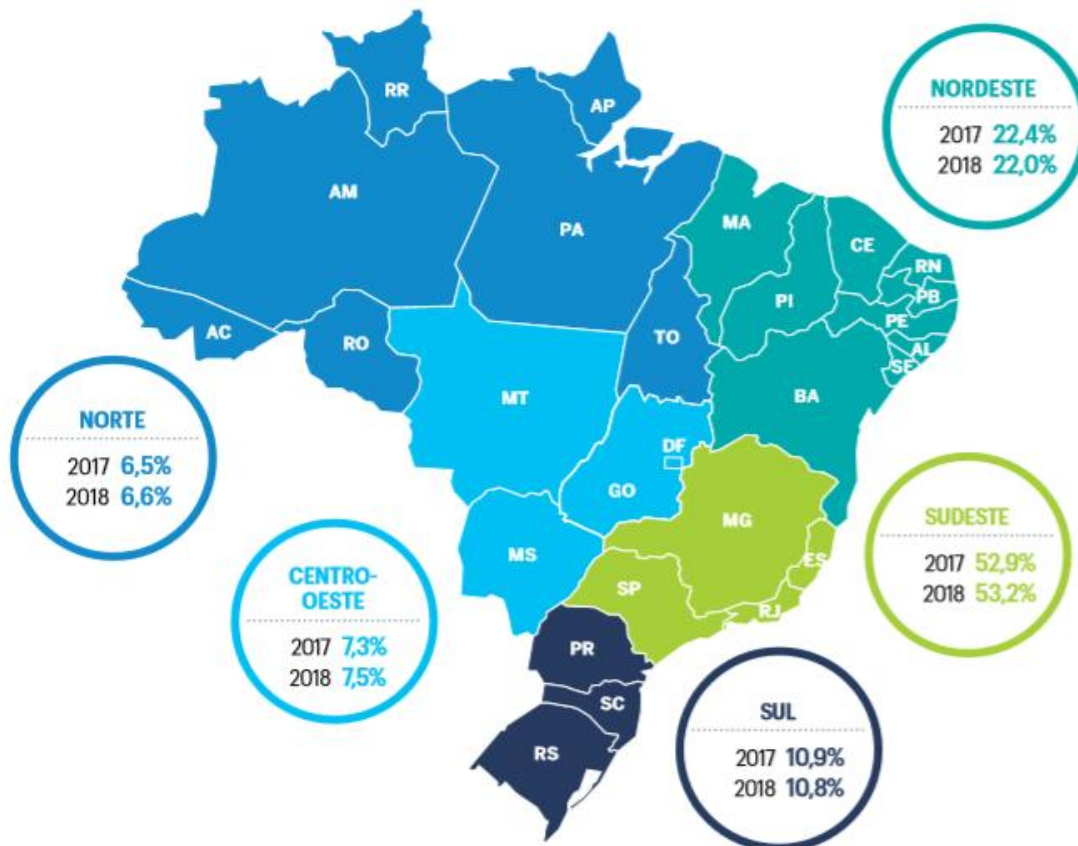
Figura 1 - (a) - Geração Total de RSU (t/dia) nos anos de 2017 e 2018; (b) – Coleta Total de RSU (t/dia) nos anos de 2017 e 2018.



Fonte: ABRELPE/IBGE (2018/2019).

Na Figura 2 observa-se a porcentagem de coleta realizada em cada região do país, onde nota-se que a maior cobertura de coleta é na região Sudeste, com 53,2% do RSU coletado, e a menor cobertura se dá na região Norte, com 6,6% de coleta.

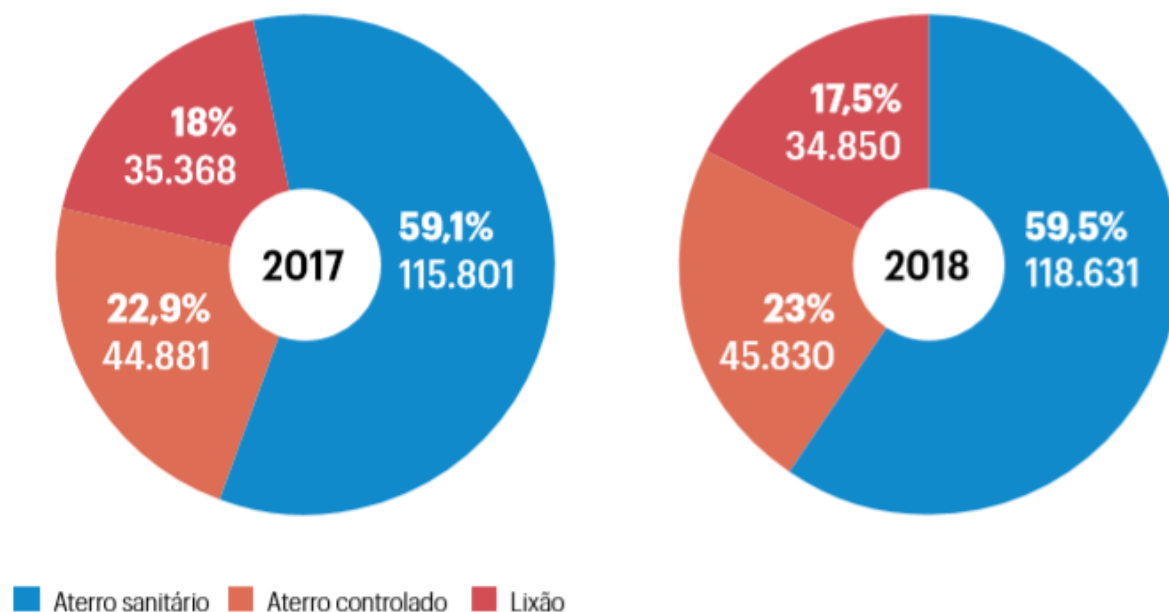
Figura 2 – Participação das regiões do país no total de RSU coletado.



Fonte: ABRELPE (2018/2019).

Está apresentada na Figura 3 apresenta a porcentagem de destinação final dos RSU, para cada região do Brasil. Em 2017 a destinação era de 59,1%, já em 2018 a porcentagem de destinação para aterros sanitários foi de 59,5%, envolvendo assim aumento mínimo. A destinação dos resíduos para aterro controlado teve um aumento pequeno em relação ao ano anterior. No ano de 2017 a porcentagem de RSU destinado para aterro controlado era de 22,9%, no ano seguinte o aumento foi muito pequeno, chegando a 23%. Para os lixões em 2017 era de 18%, diminuindo para 17,5% em 2018. Essas informações mostram que as unidades inadequadas como lixões e aterros controlados ainda estão presentes em todas as regiões do país, os quais receberam mais de 80 mil toneladas de resíduos por dia, com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos na saúde.

Figura 3 – Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação (t/dia).



Fonte: ABRELPE (2018/2019).

2.2 Resíduos Sólidos Urbanos e sua disposição

Conforme a Norma Brasileira – NBR 10004 (ABNT, 2004).

Resíduos sólidos são aqueles nos estados sólidos e semissólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Resíduos sólidos urbanos, segundo a NBR 8419/92, são os “resíduos sólidos gerados num aglomerado urbano, excetuados os resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e de aeroportos e portos”.

Segundo Charnock e Wells (1985 apud MUÑOZ, 2002), existem três métodos básicos para disposição final dos resíduos, os quais são lixão, aterro controlado e aterro sanitário. Copola (2011), por sua vez diz que, apenas o aterro sanitário é ambientalmente aceitável, devido aos estudos sobre os impactos ambientais negativos.

Lixão – local onde os resíduos são depositados sem nenhum controle ou proteção ao meio ambiente, simplesmente descartam-se os materiais vindos dos centros urbanos, gerando mau cheiro, proliferação de insetos, com diversos animais tendo acesso aos resíduos, assim espalhando-se pelo ressinto. Os líquidos e gases gerados por estes resíduos infiltram no solo, podendo atingir lençóis freáticos, ocasionando sua contaminação, assim como o solo.

Aterro Controlado – este apresenta-se como uma alternativa fácil e rápida para lixões a céu aberto, encontra-se entre os lixões e os aterros sanitários em relação a estrutura e desempenho. É uma medida paliativa, a qual ajuda na diminuição dos impactos ambientais. Possui mecanismos de impermeabilização e captação de gases, mas em menor escala que os aterros sanitários e com menor capacidade de desempenho.

Aterro Sanitário – melhor alternativa, dentre as citadas, para destinação dos resíduos sólidos urbanos, apresentando impermeabilização adequada, tanto em sua base como em sua cobertura, assim minimizando a contaminação do meio ambiente.

2.3 Aterros Sanitários

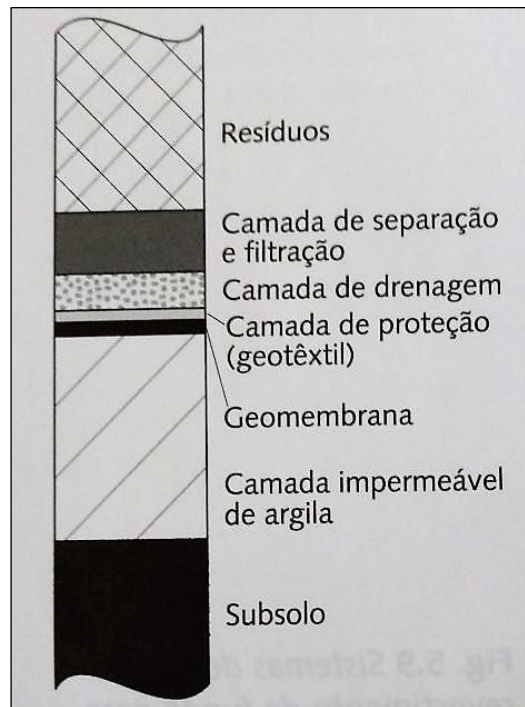
Para D'almeida & Vilhena (2000), aterro sanitário é o local utilizado no processo de disposição de resíduos sólidos no solo, particularmente resíduo domiciliar, que, fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permite um confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública. Os autores também comentam que nos aterros sanitários pode-se distinguir processos de tratamento por digestão anaeróbia, digestão aeróbia e digestão semi-anaeróbia.

Para construção e monitoramento de um aterro sanitário são utilizados critérios e normas preconizadas pela ABNT, como a NBR 8419/92 que apresenta as condições mínimas exigíveis para apresentação de projetos de aterros sanitários de RSU, assim podendo proporcionar confinamento seguro dos resíduos, para com isso evitar os danos que são causados pela degradação destes no meio ambiente.

A base de um aterro é composta por um sistema de impermeabilização, que segundo a FEAM (2006), deve garantir a segura separação da disposição de resíduos do subsolo, impedindo a contaminação do lençol freático e do meio natural através de infiltrações de percolados e/ou substâncias tóxicas. Além disso, para desempenhar tal

função de maneira eficiente, a camada de impermeabilização de materiais deve ser composta de solo argiloso de baixa permeabilidade ou geomembrana sintética com espessuras adequadas. Na Figura 4, está apresentada uma exemplificação de um sistema de impermeabilização do fundo da base de um aterro.

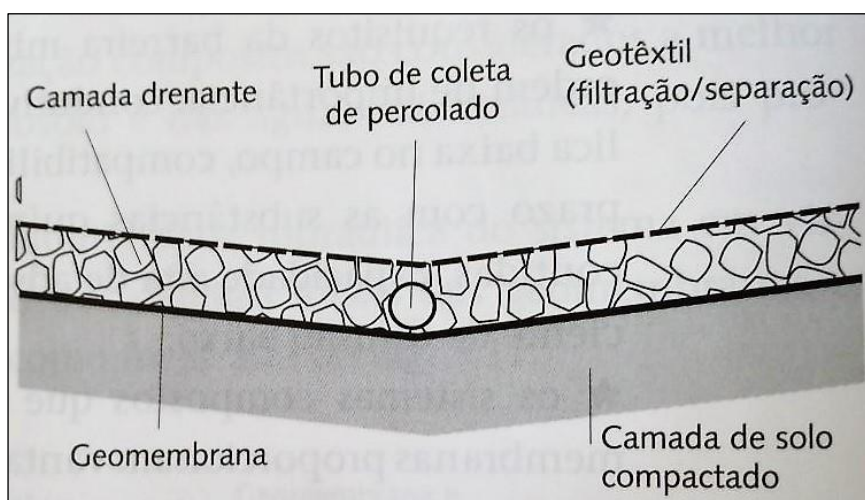
Figura 4 – Esquema ilustrativo do revestimento de fundo da base de um aterro.



Fonte: Boscov (2008).

Conforme Elk (2007) o sistema de drenagem de líquidos percolados é composto por uma rede de drenos internos com o objetivo de transportar os líquidos percolados até um sistema de tratamento. Estes drenos devem ser compostos de material resistente ao resíduo a ser transportado e projetado de maneira a não vir a sofrer obstruções. Na Figura 5 é possível observar um esquema ilustrativo de um sistema de drenos para líquidos percolados em um aterro sanitário.

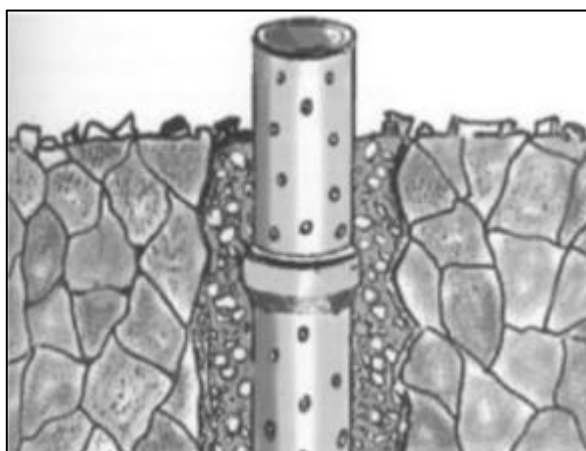
Figura 5 – Sistema de drenagem para líquidos percolados, esquema ilustrativo.



Fonte: FERRARI (2005).

A drenagem de gases é feita através de uma rede de drenagem constituída de drenos verticais e horizontais interligados, assim evitando que os gases evadam através dos meios porosos que constituem o subsolo e atinjam fossas, esgotos e até edificações. Sua composição se dá por tubos de concreto envoltos por materiais granulares, como brita ou rachão. Esses materiais são fixados à coluna de tubos por meio de uma tela metálica (Elk, 2007). Na Figura 6 observa-se um esquema da construção de um dreno vertical de gás.

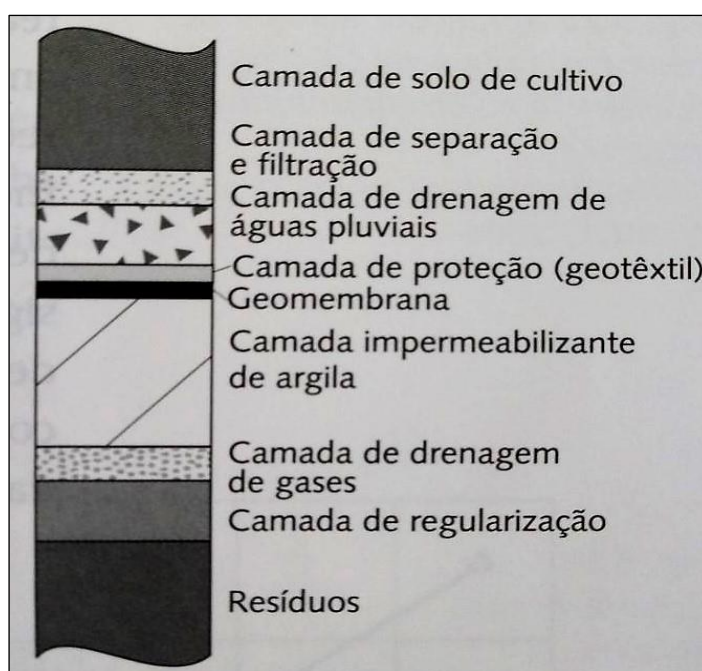
Figura 6 – Construção de um dreno vertical de gás.



Fonte: Geraldo (2019).

A Camada de cobertura tem a finalidade de diminuir os impactos ao meio ambiente, reduzir odores, entre outros fatores contaminadores, usa-se uma camada de cobertura sobre os resíduos dispostos no aterro. Conforme Silva (2010), no caso de aterro de resíduos sólidos urbanos existem camadas de cobertura durante a vida útil do aterro sanitário (coberturas diária e intermediária) e após encerramento das atividades do aterro (camada final). Está representado na Figura 7 um esquema da camada de cobertura de um aterro sanitário.

Figura 7 – Esquema ilustrativo da camada de cobertura ou revestimento impermeável.



Fonte: Boscov (2008).

2.4 Compressibilidade e Recalques em Aterros Sanitários

2.4.1 Generalidades

Para Van Meerten et al. (1995), a compressão de maciços sanitários é o resultado dos processos de carregamento e alterações das características e propriedades dos materiais que compõem o maciço de resíduos sólidos urbanos, correspondentes à solicitação mecânica imposta por camadas superiores, ravinamento interno, alterações físico-químicas, biodegradação e atividade microbiológica.

Segundo Edil et al (1990), os fatores que afetam e condicionam a magnitude dos recalques provocados por peso próprio ou sobrecargas são muitos e se inter-relacionam, destacando a densidade ou índice de vazios inicial dos resíduos, quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos, altura do aterro sanitário, trajetória de tensões durante e após a disposição dos resíduos, nível dos líquidos percolados e faixa de variação do mesmo no interior do maciço, e condições ambientais (umidade, temperatura, presença de gases, entre outros).

2.4.2 Fatores geradores de recalques

Segundo El-fadel & Khoury (2000), fundamentados na proposta original de Sowers (1973), citam que os mecanismos que governam os recalques nos aterros sanitários de resíduo sólido urbano, tem sido definidos como: mecânico, ravinamento, mudança das propriedades físicas, decomposição biológica e interações entre estes mecanismos. Caracterizados como segue:

- **Mecânico** - depois da aplicação da carga, as partículas do resíduo sofrem uma distorção, dobramento, trituração e são reorientadas por si mesmas, para melhor acomodação, formando situações de novos esforços de deformação mecânica. Sendo este processo similar a compressibilidade de solos não orgânicos.

- **Ravinamento** - devido à ampla margem de variação dos tamanhos das partículas do RSU, as partículas menores podem tender a movimentar-se dentro dos vazios das partículas maiores, provocando recalques adicionais especialmente durante a compactação.

- **Mudanças das propriedades físicas** - correspondem aos fenômenos físicos que acontecem no RSU tais como corrosão, oxidação e/ou degradação do material do resíduo sólido.

- **Processos biológicos** - devido aos processos de decomposição biológica, aeróbia e anaeróbia, os quais geram uma perda de massa do maciço de RSU.

- **Processos de interação entre os mecanismos já mencionados** - podem causar ainda mais recalques, tais como quando o metano e o calor liberado da degradação aumenta mais a degradação, ou quando a consolidação aciona o ravinamento.

2.4.3 Estágios da Compressibilidade

Devido a variabilidade da composição dos RSU, os mecanismos que governam os recalques em aterros sanitários são muitos e complexos, pois além de cada material componente apresentar suas próprias características de compressibilidade, os processos de degradação que ocorrem ao longo do tempo resultam na formação de gases e chorume, com consequente redução da massa e de volume dos resíduos depositados (Carvalho et al., 2000).

De acordo com Wall & Zeiss (1995) e Ouvry & Page (2005) os recalques ocorrem essencialmente em três estágios distintos, estes são: compressão inicial, compressão primária, e a compressão secundária.

Na *compressão inicial*, ou mecânica, ocorre o recalque diretamente quando a carga, RSU, é aplicada ao aterro. Tal é associada com a compactação imediata dos espaços vazios e partículas devido a uma carga sobreposta.

Na segunda fase ocorre a *compressão primária* que é a compactação originada pela dissipação de excessos de poropressões dos espaços vazios e ocorre rapidamente, geralmente em até 30 dias à aplicação da carga. Tal processo geralmente é descrito para aterros usando a analogia da teoria de Terzaghi para o fenômeno de adensamento em solos.

A *compressão secundária* decorre devido ao peso do corpo do aterro e decomposição da matéria orgânica. Sowers (1973) atribui os recalques secundários dos resíduos a uma combinação de compressão mecânica secundária, ações físico-químicas e decaimento bioquímico. O autor ainda sugere que o aumento das taxas de degradação, devido a condições favoráveis de decomposição biológica, resulta em altos valores de índice de compressão secundária e consequentemente taxas de recalques mais elevadas.

2.4.4 Efeito da Biodegradabilidade nos recalques dos RSU

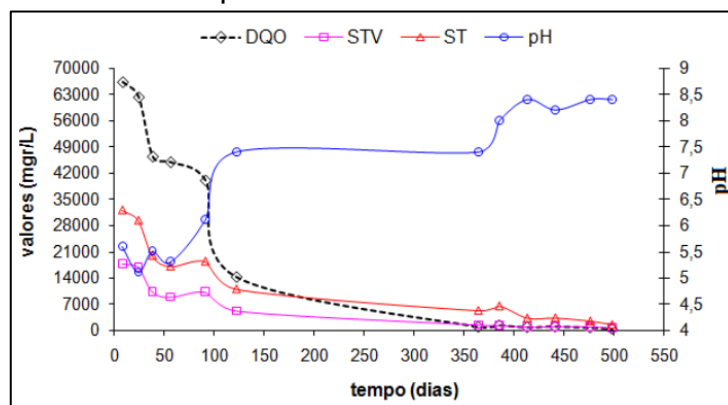
Como os solos naturais, os RSU são meios multifásicos constituídos pelas fases sólida, líquida e gasosa. Em um primeiro momento, tem-se o predomínio da parte sólida, após algum tempo, devido ao processo de biodegradação, surgem as fases líquida (chorume, percolado ou lixiviado) e gasosa (gás carbônico, gás metano

e outros). Essas duas últimas fases estão relacionadas aos processos de decomposição dos resíduos ao longo do tempo, os quais estão diretamente associados ao teor de umidade, conteúdo orgânico e condições climáticas (Grisolia & Nopoleoni, 1996; Cartier & Baltdit, 1983).

Os mecanismos de assentamento de resíduos podem ser divididos em duas categorias, assentamento mecânico e assentamentos devidos à biodegradação. O assentamento mecânico é causado por distorção física, flexão, esmagamento e reorientação de partículas devido à carga aplicada e fluência (Bareither et al., 2008). Sendo consequência da biodegradação anaeróbia da matéria orgânica, os assentamentos devido a biodegradação, induzem uma perda de massa sólida convertida principalmente em biogás e proporcionalmente menos sólidos dissolvidos e suspensos no lixiviado. A cinética de biodegradação depende de vários parâmetros bioquímicos, incluindo quantidade e natureza da matéria orgânica, teor de umidade, populações microbianas, temperatura e pH (Mehta et al., 2002; Dixon e Jones, 2005; McDougall, 2007).

Está apresentado na Figura 8 o comportamento das propriedades físico-químicas de lixiviados drenados de um lisímetro experimental, monitorados por Tapahuasco (2009) por um período de 500 dias. Na Figura, observa-se que nos primeiros 100 dias há uma redução drástica dos valores de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Totais (ST) e Sólidos Totais Voláteis (STV), paralelamente os valores do pH aumentam também de forma acentuada. Após isso, o comportamento das curvas de DQO, ST e STV mostram-se mais suavizadas e, apresentando valores mínimos, já o pH entra numa fase estável neutra até os 370 dias aproximadamente, entrando posteriormente numa fase alcalina.

Figura 8 – Propriedades físico-químicas lisímetro LS-01.



Fonte: Tapahuasco (2009).

Na Figura 8 pode ser observado o comportamento da Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV) e pH. Tal comportamento se deu em valores altos de DQO nos primeiros 100 dias, acompanhado de ST e STV, seus valores 62000, 29250 e 16769 mg/l, respectivamente. Passados os 100 primeiros dias, estes valores de DQO, ST e STV decaem seguidos de grande aumento dos valores de pH. Os primeiros 100 dias são considerados fase ácida e após, fase alcalina. Este comportamento acompanha as fases de deformação vertical estimadas pelo autor em seu modelo de previsão de recalques, onde a primeira e segunda fase correspondem a fase ácida, primeiros 100 dias, seguido pela terceira fase onde se dá a biodegradação dos RSU.

2.4.5 Modelos de previsão de recalques

Conforme Manassero et al (1996), é de difícil avaliação o valor de recalque final dos RSU, o qual sendo composto por um recalque inicial que ocorre em um curto período de tempo após a construção do aterro. Seguidamente, um recalque secundário que ocorre ao longo de um período de tempo significativo. Os autores citam que a taxa de recalques diminui com o passar do tempo e com o aumento da profundidade do resíduo em relação a superfície do aterro.

Marques (2001) comenta que a escolha adequada de modelos para previsão de recalques, assim como seus parâmetros de cálculo, é o principal limitante nas análises de deformabilidade de aterros sanitários. A decorrência desta dificuldade se dá pela interação de diferentes mecanismos, tais como fluência, degradação biológica e etc., no processo de compressão dos resíduos, que seguem leis próprias de comportamento e são governados por parâmetros distintos entre si.

Com o intuito de certificar a aplicação em aterros sanitários, nesta pesquisa serão estudadas as equações de estimativas de recalques propostas por Tapahuasco (2009). Além disso, visando fazer uma análise comparativa serão estudados os modelos de Bjarngard e Edgers (1990) e modelo de Meruelo formulado por Diaz (1995).

2.4.5.1 Modelo de Bjarngard e Edgers (1990)

Segundo Bjarngard (1990), este modelo foi proposto a partir da compilação e análise de diferentes dados de observação e monitoração de aterros sanitários, com a geração de um procedimento empírico de avaliação de recalques, o qual observamos na equação 1.

$$\frac{\Delta H}{H} = C_c \log \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0} + C_{\alpha 1} \log \frac{t_2}{t_1} + C_{\alpha 2} \log \frac{t_3}{t_2} \quad (1)$$

Onde:

ΔH : recalque;

H: altura inicial da camada em análise;

σ_0 : tensão vertical efetiva inicial ao meio da camada em análise;

$\Delta \sigma$: incremento de tensão vertical ao meio da camada sob análise;

t_1 : tempo, em dias, para conclusão da compressão inicial;

t_2 : tempo, em dias, para conclusão da compressão intermediária;

t_3 : tempo, em dias, para o qual é feita a previsão do recalque;

C_c : coeficiente de compressão primária;

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

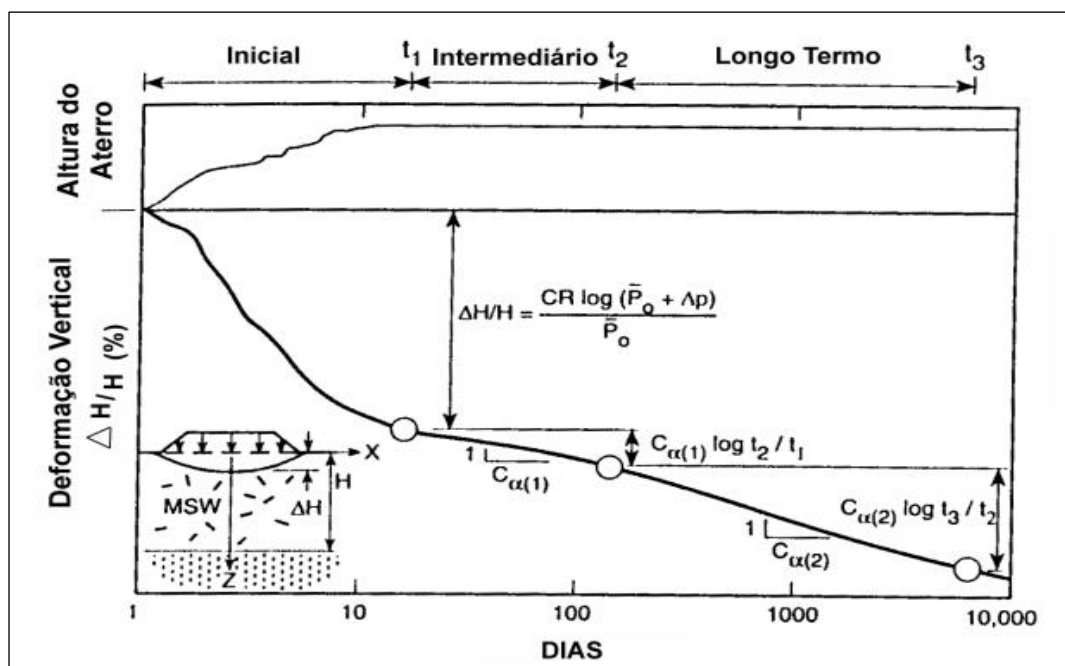
$C_{\alpha 2}$: coeficiente de compressão secundária de longo prazo;

Foi observado pelos autores a existência de 3 fases de evolução dos recalques, sendo a primeira a fase inicial ou compressão primária, onde os recalques ocorrem de forma rápida pela compressão mecânica dos resíduos e redução dos vazios existentes; a segunda fase ou compressão secundária intermediária, que corresponde essencialmente às iterações mecânicas; terceira fase ou compressão secundária de longo prazo, onde os efeitos da biodegradação dos resíduos são acrescentados aos mecanismos da fase anterior, implicando taxas de recalques mais elevadas.

Com a aplicação do modelo os autores determinaram os valores dos coeficientes, $C_{\alpha 1}$ valores entre 0,003 e 0,038 (média de 0,019), $C_{\alpha 2}$ com valores entre 0,017 e 0,51 (média de 0,125).

Na figura 9 observa-se o modelo de recalque proposto pelos autores.

Figura 9 – Modelo de compressão unidimensional proposto por BJARNGARD & EDGERS



Fonte: BJARNGARD & EDGERS (1990).

2.4.5.2 Modelo de Meruelo (1995)

Através de estudos realizados no aterro sanitário de Meruelo, Diaz et al. (1995) propuseram o modelo de previsão de recalques, o qual se baseia na degradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos. Os parâmetros levados em consideração no modelo são parâmetros que determinam os processos de degradação (tempo, teor de matéria orgânica, umidade, ritmo de desenvolvimento dos processos de degradação, etc.), conforme a equação 2.

$$S_s = \alpha \cdot H \cdot COD \left[1 - \frac{1}{k_h \cdot t_c} \cdot e^{-k_h \cdot t - t_c} - e^{-k_h \cdot t} \right] \quad (2)$$

Onde:

α : coeficiente de perda de massa;

H: altura do aterro;

COD: quantidade de matéria orgânica biodegradável presente nos resíduos por ano;

t_c : tempo de construção do aterro (dias);

k_h : coeficiente de hidrólise (dia⁻¹);

t: tempo para o qual se deseja prever recalques.

A equação 3 reproduz as formulações para a degradação de resíduos orgânicos, levando em consideração que a massa de resíduos é degradada continuamente e que tais resíduos têm sido acrescidos durante um tempo definido com um ritmo constante que, após um tempo, cessa. Segundo Melo (2003) na fração orgânica dos resíduos dispostos no aterro, é possível encontrar materiais que se degradam mais rápido que outros, assumindo-se que na fração orgânica, uma parte se degradará nos primeiros 30 anos, com isso os principais recalques estarão em função do valor dessa fração. O autor especifica que em todos os casos existem dificuldades para determinar-se a cota superficial do aterro no início do processo de degradação no momento que ainda estão sendo depositados os resíduos. Assim, a determinação de um tempo “t₀” deve ser imposta, sendo obtido quando atinge um primeiro nivelamento do maciço. Dessa forma a equação 3 expressa o recalque produzido a partir “t₀” (t₀ > t_c):

$$\Delta s = \frac{\alpha.H.COD}{k_h.Tc} (1 - e^{k_h.Tc}). (e^{-k_h.t} - e^{-k_h.t_0}) \quad (3)$$

Onde:

Δs : recalques ocorridos entre t₀ e t;

t₀: idade do aterro no início do nivelamento;

t: idade do aterro no último nivelamento;

α : coeficiente de perda de massa;

H: altura do aterro;

COD: quantidade de matéria orgânica biodegradável presente nos resíduos por ano;

T_c: tempo de construção do aterro (dias);

K_h: coeficiente de hidrólise (dia⁻¹)

A equação 2 é utilizada para situações em que a espessura do montante de RSU estudado, é a existente no momento em que se iniciam os monitoramentos, enquanto a equação 3 utiliza-se da espessura final de construção do montante.

De acordo com Palma (1995) a matéria degradada é expressa como uma fração do total de material contido no aterro, enquanto a relação entre o volume de recalques produzidos e a correspondente massa perdida por degradação (α) é uma constante característica do tipo de aterro e dos resíduos depositados. A obtenção do

valor de α , é apresentado na equação 4, coeficiente de perda de massa transformada em recalques.

$$\alpha = \frac{\Delta S_s k_h T_c}{H COD (e^{-k_h T_c} - 1)(e^{-kt} - e^{-kt_0})} \quad (4)$$

- α : coeficiente de perda de massa transformada em recalques;
- ΔS_s : recalques ocorridos;
- t_0 : idade do aterro no início do nivelamento;
- t : idade do aterro no último nivelamento;
- H : altura do aterro;
- COD : quantidade de matéria orgânica biodegradável presente nos resíduos por ano;
- T_c : tempo de construção do aterro (dias);
- k_h : coeficiente de hidrólise (dia⁻¹)

Conforme Simões (2000), a hipótese principal adotada no modelo é referente à identificação da hidrólise como principal fator limitante no processo de biodegradação. Tal é baseada no fato de que a hidrólise é o mecanismo mais frequentemente utilizado pelos microrganismos para transformar compostos orgânicos complexos em compostos simples, possibilitando a obtenção de condições favoráveis à completa decomposição dos resíduos em estágios sucessivos

O método a ser validado através deste trabalho será apresentado no próximo item, até então, aplicado apenas para lisímetros e células experimentais. Para isso serão utilizados as características e dados históricos de recalques dos aterros sanitários, Belo Horizonte e Muribeca, a fim de confirmar sua confiabilidade e eficácia em estimativa de recalques em aterros sanitários.

2.4.6 Equação Acoplada de Tapahuasco a Validar (2009)

Tapahuasco (2009), a partir da execução de ensaios de compressão confinada aplicados a resíduos sólidos em célula de grandes dimensões, da construção e monitoramento de 4 células e 2 lisímetros experimentais, verificou que os recalques

em maciços sanitários ao longo do tempo, correspondem três estágios de deformações, denominados pelo autor como fases.

1ª fase de deformação vertical: segundo o autor, no maciço de aterro sanitário as deformações verticais iniciais são provocadas pelo rearranjo das partículas, redução dos macroporos, eliminação de água dos macroporos e, à alta deformabilidade de alguns elementos dos resíduos. Esta parcela está representada pela equação de recalque primário da teoria de adensamento proposta Terzaghi.

$$\frac{\Delta H_1}{H_0} = \varepsilon_1 = C'_c \log \left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \right) \quad (5)$$

Onde:

$\Delta H_1/H_0 = \varepsilon_1$: deformação absoluta ao final da 1ª fase de deformação;

C'_c : coeficiente de compressão da 1ª fase de deformação;

σ_0 : tensão vertical média inicial;

$\Delta\sigma$: incremento da tensão vertical média;

$H_1 =$ recalque registrado;

$H_0 =$ altura inicial do maciço.

2ª fase de deformação vertical: deformações geradas com comportamento linear em função do logaritmo do tempo. A ocorrência das deformações se dá devido aos mecanismos de *creep* (deformação lenta das partículas de RSU), ravinamento, redução dos vazios dos microporos presentes em alguns elementos dos resíduos (dissipação de gases e líquidos). Para expressar matematicamente a 2ª fase, autor toma como referência a equação de compressão secundária da teoria de adensamento, também utilizada previamente por outros autores (Sowers, 1972, Bjarngard e Edgars, 1990).

$$\frac{\Delta H_2}{H} = C'_{s1} \log \frac{t(2)}{t(1)} \quad (6)$$

Onde:

$H_2/H_0 = \varepsilon_2$: deformação correspondente à 2ª fase de deformação;

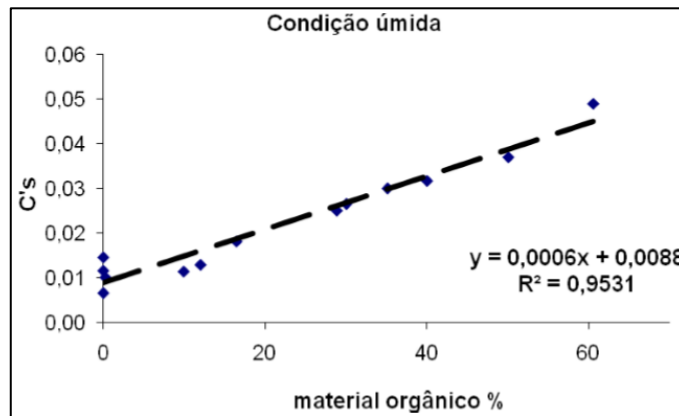
C'_{s1} : coeficiente de compressão da 2ª fase de deformação;

t_1 : tempo para completar a compressão da 1ª fase de deformação;

t_2 : tempo ao qual se deseja determinar a deformação ($t_2 \leq t_k$).

A partir da compilação de dados e da execução de ensaios edométricos, Tapahuasco (2009) verificou que o coeficiente de compressão da 2ª fase de deformação apresenta relação com o teor orgânico do RSU. Na Figura 10 está apresentada a relação C'_{s1} em função do teor orgânico.

FIGURA 10: Relação C'_s vs. % material orgânico (resíduos sólidos urbanos, condição peso úmido).



Fonte: Tapahuasco (2009).

Levando em consideração da relação linear do C'_{s1} vs teor orgânico do RSU (Figura 10), Tapahuasco (2009) propõe uma adaptação da equação 6, resultando na equação 7.

$$\frac{\Delta H_2}{H_0} = \varepsilon_2 = (0,0006(\%M_{org-nat.}) + 0,0088) \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (7)$$

Onde: $\%M_{org-nat.}$ é a quantidade de material orgânico em porcentagem de peso úmido do RSU.

3ª fase de deformação vertical: parcela de deformações ocorridas após um tempo t_k e influenciadas estritamente pela bioconversão da massa orgânica em gás natural, onde também as deformações da segunda fase continuam a se desenvolver, devido a interações mecânicas (creep e ravinamento). Expressa pela equação 8.

$$\varepsilon_{3[t]} = (0,0006(\%M_{org-nat.} \cdot (e^{-k'(t-t_k)})) + 0,0088) \log\left(\frac{t}{t_k}\right) + \varepsilon_{org-nat.}(1 - e^{-k'(t-t_k)}) \quad (8)$$

Onde:

ε_3 : deformação correspondente à 3ª fase de deformação;

%M_{org.-nat.}: massa orgânica biodegradável ainda não decomposta;

t_k : tempo de início da bioconversão das massas;

k' : constante de degradação cinética da primeira ordem;

t : tempo;

$\varepsilon_{org-nat.}$: deformação orgânica total devido à biodegradação.

Deformação total: estimada para um determinado tempo “t” (onde $t > t_k$), é a soma das equações da 1ª, 2ª e 3ª fase de deformação vertical, a qual observamos na equação 8.

$$\varepsilon_{[t]} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_{3[t]} \quad (9)$$

Onde:

$\varepsilon_{[t]}$: Deformação vertical total registrada no tempo t;

ε_1 : Deformação da 1ª fase;

ε_2 : Deformação da 2ª fase;

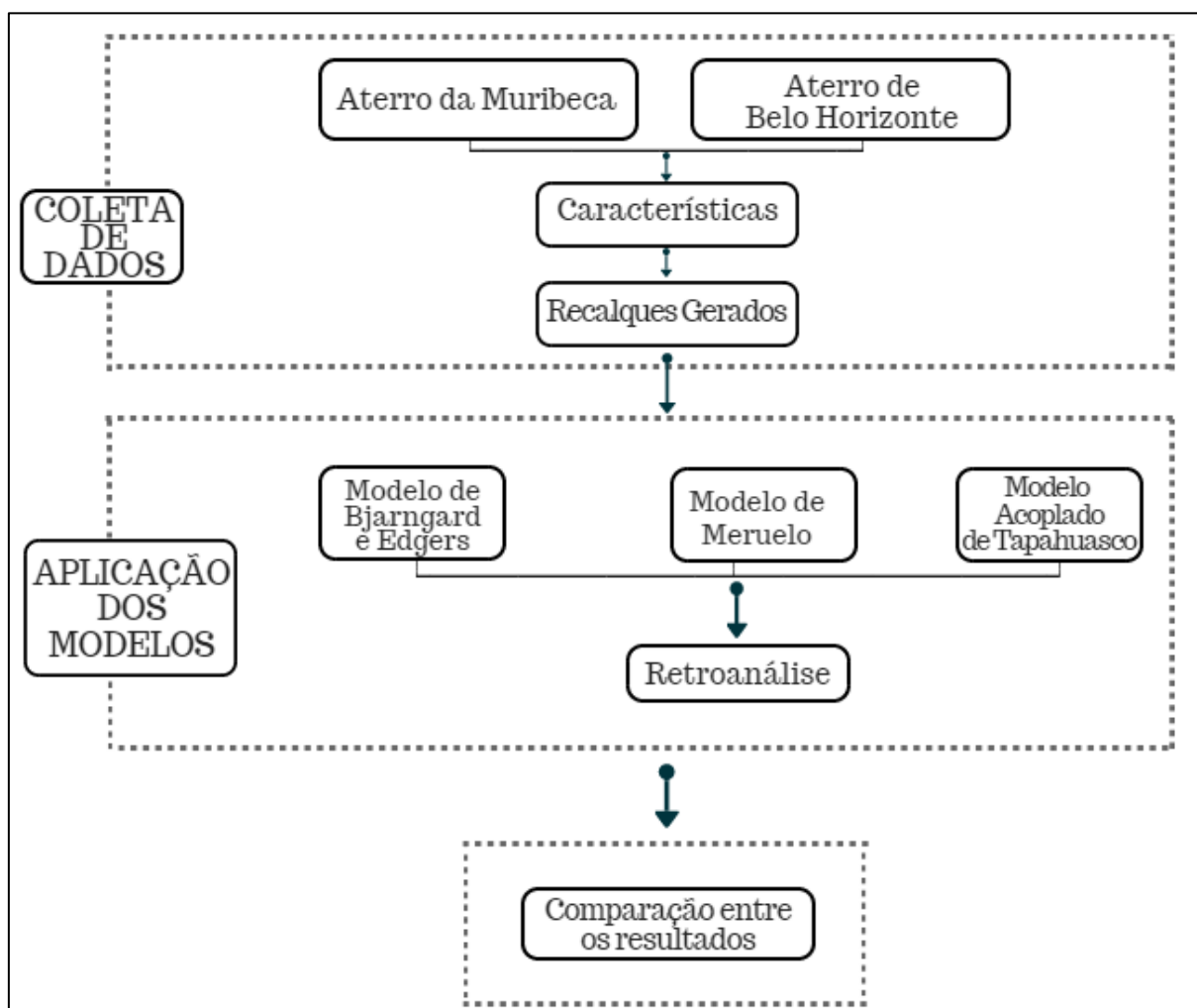
$\varepsilon_{3[t]}$: Deformação da 3ª fase no tempo t.

O modelo acoplado de Tapahuasco (2009) até então havia sido aplicado apenas em modelos reduzidos, a partir de deformações registradas em lisímetros e em células experimentais.

3 METODOLOGIA

A metodologia neste trabalho consistiu na coleta de informações do aterro sanitário de Belo Horizonte e do aterro da Muribeca, envolvendo a compilação de dados históricos de operação, características físicas das células sanitárias e dos resíduos dispostos, além dos registros de recalques e alguns parâmetros de compressibilidade. Tal metodologia encontra-se estruturada no fluxograma mostrado na Figura 11.

Figura 11: Fluxograma da metodologia desenvolvida.



Fonte: Elaboração própria.

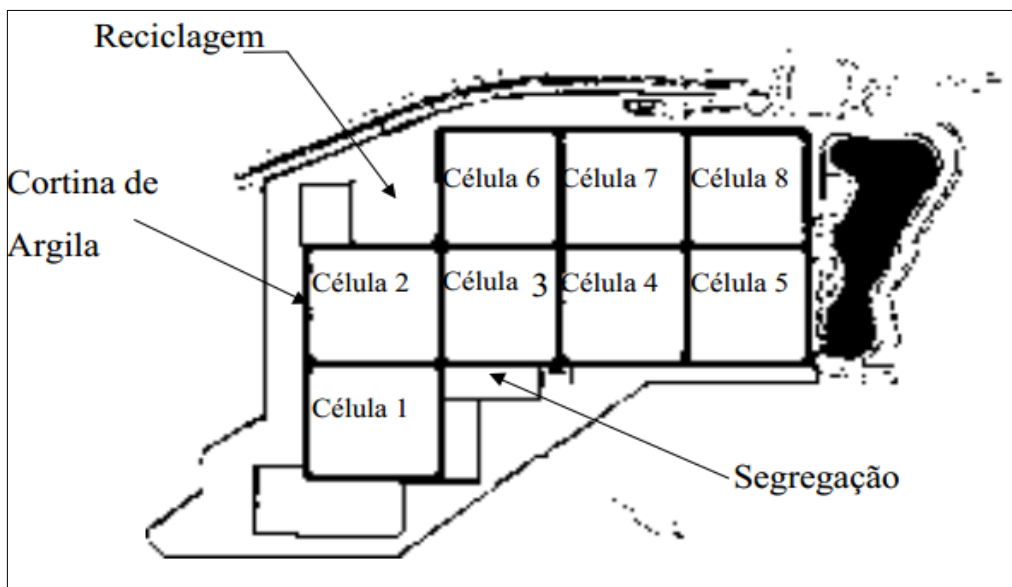
3.1 Compilação de dados de operação e monitoramento dos recalques registrados

3.1.1 Aterro da Muribeca

Localizado na Região Metropolitana de Recife/PE. Segundo Melo (2003), o aterro recebia até ano 2003 em média 3.000 toneladas diárias de resíduos, tanto domésticos como industriais, possuindo uma área de 60 hectares. O aterro é constituído por células de 200mx200m, com espessura de camada de RSU variando de 20 a 30 metros. A composição média dos resíduos na entrada do Aterro é caracterizada por 60% matéria orgânica, 15% papel, 8% plástico, 2% vidro, 2% metal e 13% outros (Jucá *et al.*, 1999).

Na Figura 12 é apresentada a disposição das células do Aterro da Muribeca.

Figura 12 – Vista das células do Aterro da Muribeca.



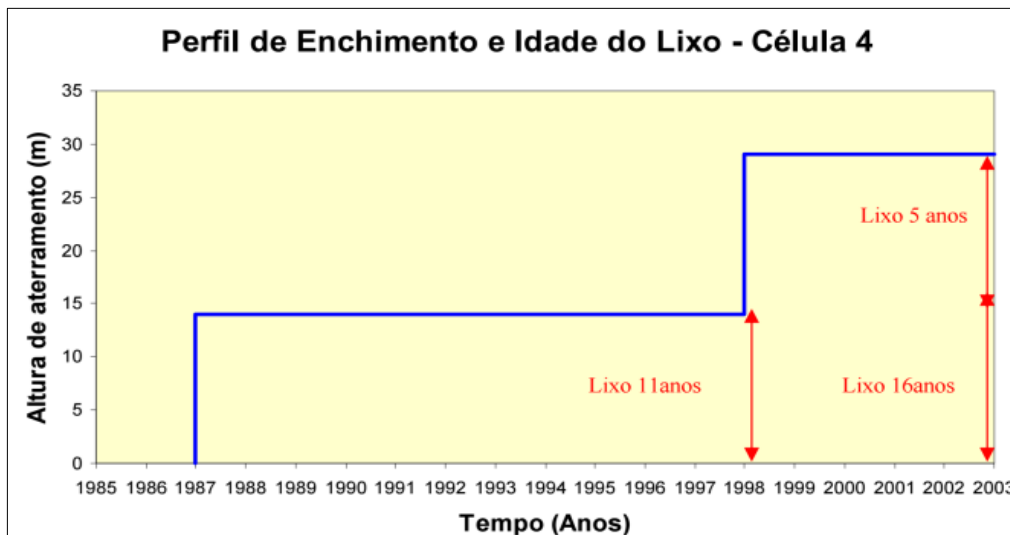
Fonte: Melo (2003).

Para o estudo dos recalques do Aterro Muribeca, utilizou-se como referências bibliográficas os trabalhos desenvolvidos por Melo (2003) e Monteiro (2003), focando especificamente o monitoramento da célula 4. Dessa forma, foram compilados os dados de espessuras da célula e monitoramento das deformações verticais.

Segundo Monteiro (2003), a célula 4 apresenta uma certa heterogeneidade em relação à idade do lixo aterrado. Onde as camadas iniciais de aterramento, que possuem profundidade de 15 a 29 metros, têm idade de 16 anos (1987 a 2003). As camadas superiores, que possuem profundidade de 0 a 15 metros, têm idade de 5 anos (1998 a 2003).

Na Figura 13 observa-se os alteamentos ocorridos da célula 4.

Figura 13 – Perfil de enchimento e idade de RSU presentes na célula 4



Fonte: Monteiro (2003).

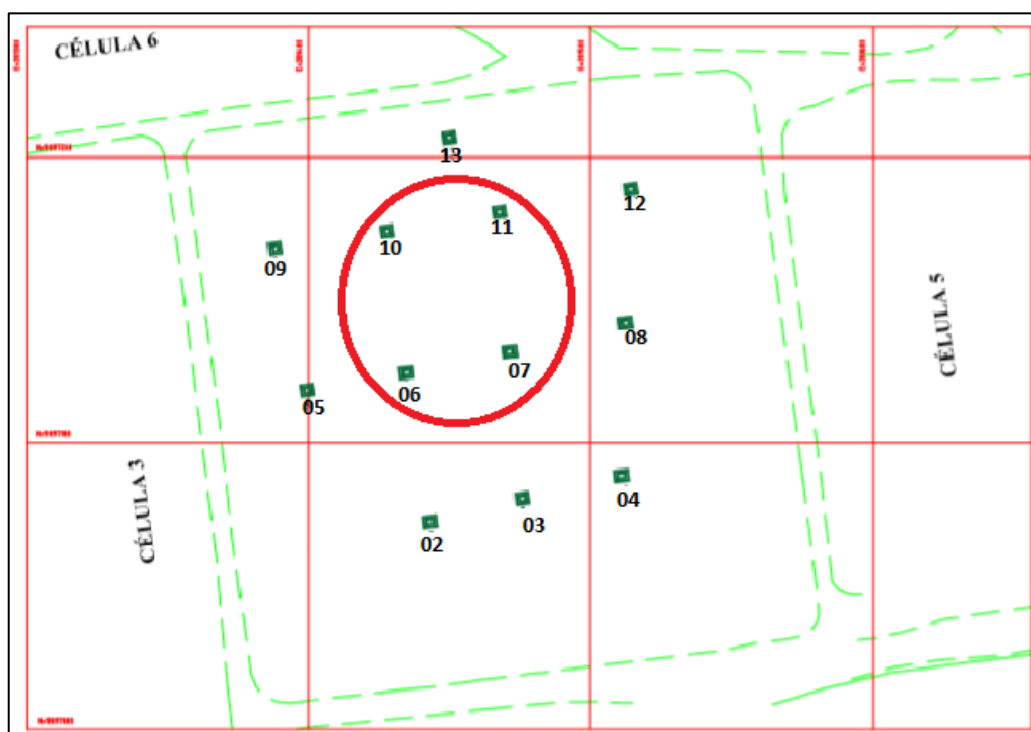
Com base nas informações disponibilizadas por Melo (2003), é importante salientar que a camada de cobertura da célula 4 não foi devidamente executada, sendo apenas disposto, em cima da célula, entulho de obra com espessura variável de 0,20 metros a 1 metro. Em virtude disso, a autor argumenta a alta permeabilidade da camada de cobertura, possibilitando a aceleração da degradação dos RSU presentes na célula.

Melo (2003), monitorou na Célula 4 os recalques tanto superficiais (uso de placas que foram distribuídas ao longo da superfície da célula), bem como subsuperficiais, (aranhas instaladas em profundidade, dispostas em camadas). O autor verificou que os deslocamentos verticais nas camadas antigas, lixo com 16 anos, são muito pequenos ou desprezíveis observando o comportamento da aranha 4, a qual estava instalada próxima a interface, entre a camada mais nova de resíduos e a camada antiga que deve se encontrar bioestabilizada. Melo analisou a camada por 3 anos, a qual obteve um deslocamento de 140mm durante este período, assim o autor considerou comprovada a bioestabilização da camada, devido este valor ser bastante pequeno. A partir disso, para este trabalho de conclusão de curso, desconsiderou-se os recalques das camadas antigas (15 a 29 m), assumindo elas como estáveis. Com

a isso, serão consideradas apenas as deformações da camada mais recente da célula, correspondente aos últimos 15 metros de espessura.

Na Figura 14 visualiza-se a disposição das placas de recalques sobre a superfície da célula 4. Para este estudo foram utilizadas as placas 07, 06, 10 e 11, por se localizarem no quadrante central da célula e por estarem próximas umas das outras (permitindo uma melhor isotropia) e, pela maior facilidade na extração dos dados de recalques a partir dos gráficos disponibilizados pelos autores (Melo 2003 e Monteiro 2003).

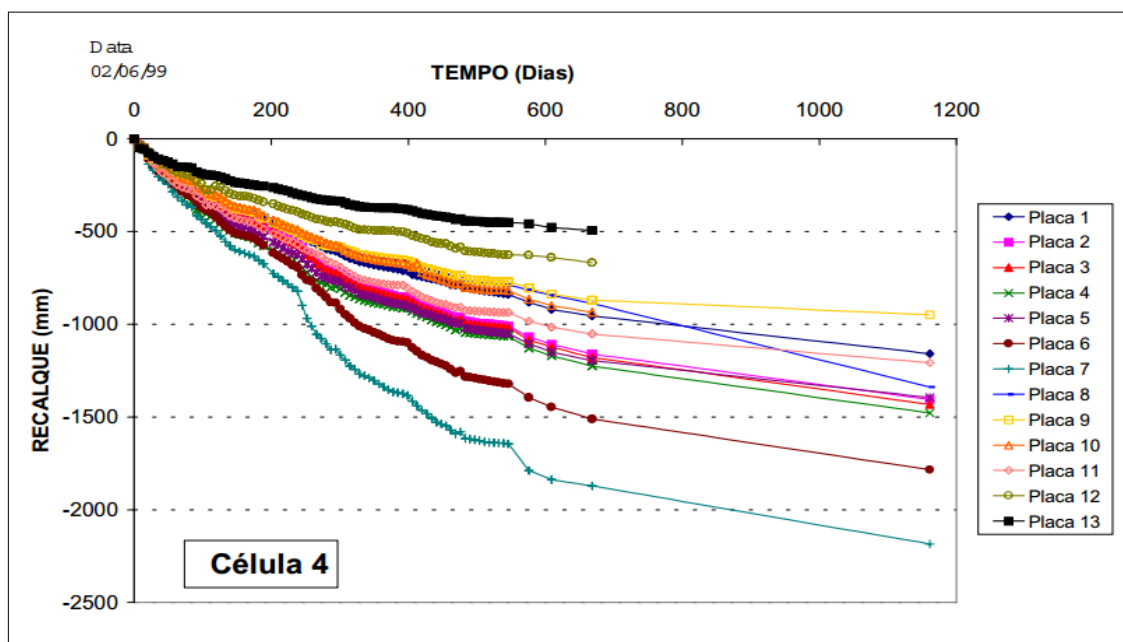
Figura 14 – Localização das placas na célula 4.



Fonte: Modificado de Melo (2003)

Na Figura 15 observam-se os recalques superficiais da célula 4 monitorados por Melo (2003), onde a menor evolução dos recalques foi na placa 13 e a maior na placa 7.

Figura 15 – Evolução dos recalques superficiais com o tempo na célula 4.



Fonte: Melo (2003).

Considerando que os recalques superficiais das placas 07, 06, 10 e 11 da Célula 4 do aterro da Muribeca, são apresentados por Melo (2003) no formato gráfico, neste trabalho utilizou-se a ferramenta GraphData 1.0, o qual permite a digitalização numérica de dados a partir de figuras. O programa varre a imagem de baixo para cima (ou vice-versa), medindo a distância da parte superior (ou inferior) até a linha do gráfico. Através dos valores máximos e mínimos relatados para os eixos X e Y, o programa gera os valores numéricos de cada ponto (X, Y) ao longo da linha do gráfico, correspondendo à escala usada na figura original. Assim foi possível extrair de modo satisfatório os dados de recalques de cada placa estudada.

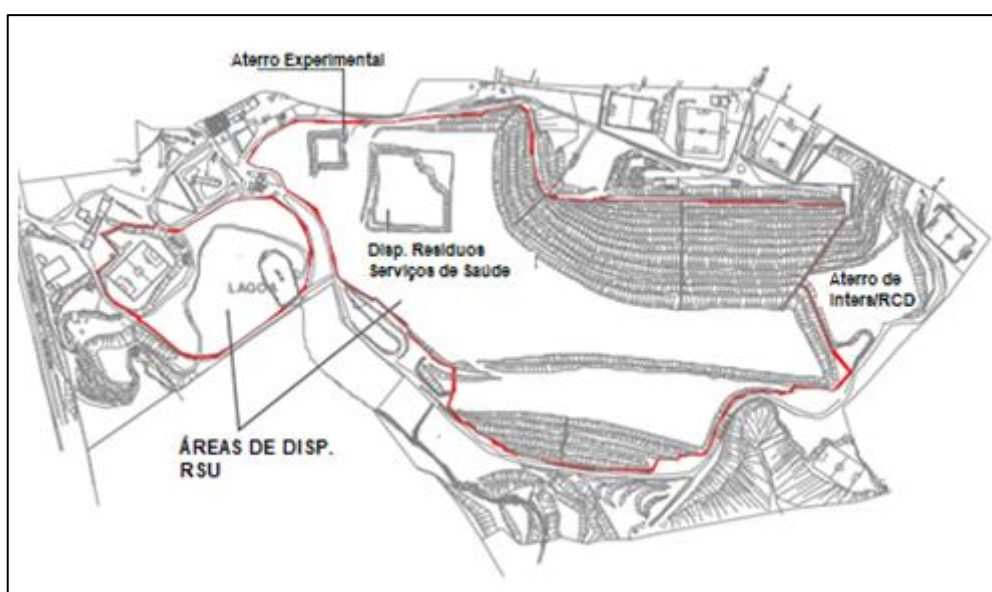
3.1.2 Aterro de Belo Horizonte

Localizado na Região Noroeste da capital mineira com as coordenadas geográficas, latitude -19.914831° longitude -44.059090° , possuindo uma área de 145 hectares. Segundo Silva (2010), até 2007 o aterro recebia aproximadamente 4.200 toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos. O autor cita que o aterro iniciou suas atividades em 1975, funcionando por 14 anos como Aterro Controlado e, posteriormente, em 1989 como aterro sanitário energético. Em 1995 adotou-se a

técnica de biorremediação como forma de tratar a massa de resíduos aterrada. Em 2002 voltou a ser operado de forma convencional. No ano de 2007 foi encerrado o recebimento de RSU, recebendo em 2010 apenas resíduos da construção civil e de serviços de saúde.

Na Figura 16 observa-se o layout da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos (CTRS) do Aterro de Belo Horizonte, visualizando-se as áreas de disposição dos resíduos.

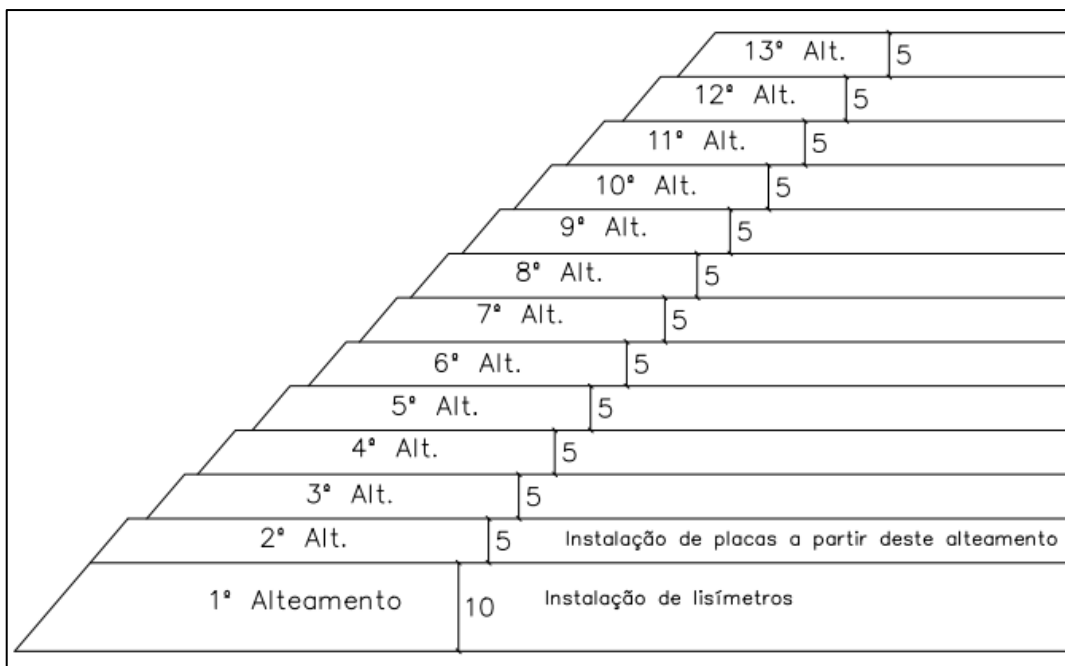
Figura 16 – Layout da CTRS do Aterro de Belo Horizonte.



Fonte: Silva, 2010.

Para o desenvolvimento deste trabalho serão utilizados os dados de recalques monitorados na célula AC-05, a qual foi estudada por Silva (2010), aplicando modelos numéricos para estimativa de recalques. O autor cita que a célula foi projetada e construída em 13 camadas, a primeira com 10 metros de espessura, e as demais com 5 metros cada, totalizando 70m. Seu preenchimento se deu em 60 meses. A Figura 17 mostra a seção de corte da disposição dos aterramentos de RSU.

Figura 17 – Alteamentos e suas espessuras originais.



Fonte: Adaptado de Silva (2010).

Com o intuito de estudar neste trabalho a célula AC-05, foram extraídos os dados das espessuras dos alteamentos, das deformações, das condições topográficas da célula e características físicas dos resíduos dispostos.

Segundo Simões et al (2004), a composição média dos resíduos dispostos no Aterro de Belo Horizonte é de: 65,46% matéria orgânica, 10,11% papel, 11,27% plástico, 2,39% vidro, 2,65% metal, rejeitos 8,12%. Na Figura 18 observa-se em vista panorâmica a célula AC-05 juntamente com outras células.

Figura 18 – Visão geral dos taludes das células AC-03, AC-04 e AC-05, em primeiro plano observa-se a célula AC-05.



Fonte: Modificado de Silva (2010).

Na Tabela 1 apresentam-se as datas de construção do topo e as datas da instalação das placas de recalques, correspondentes a cada alteamento da célula AC-

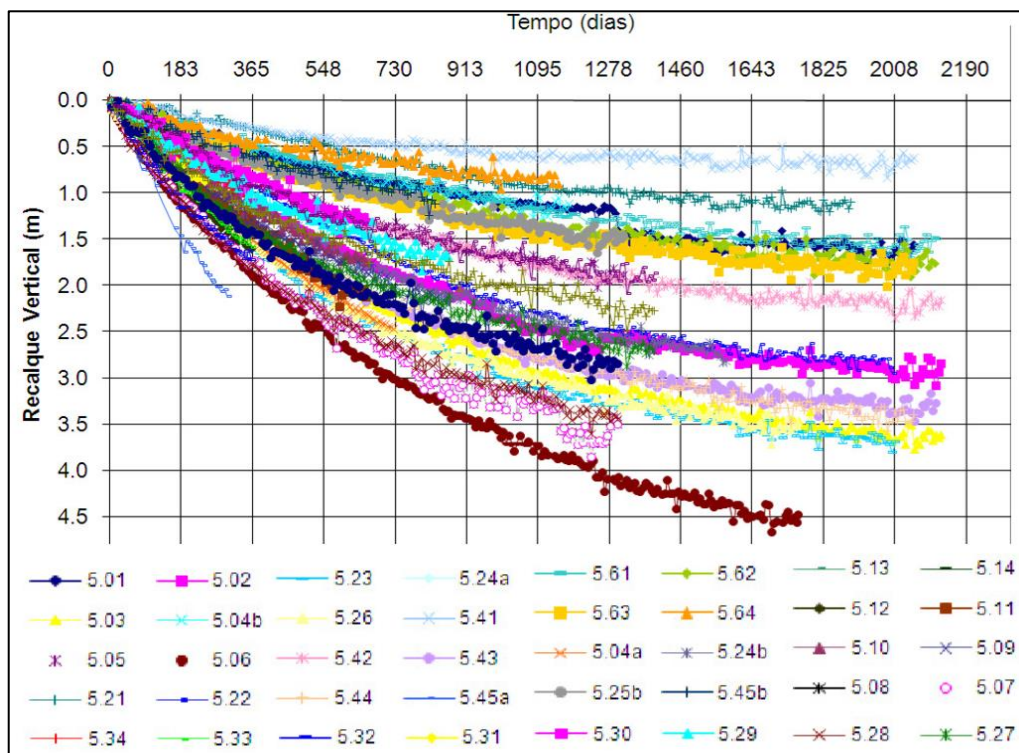
05. Já Figura 19 mostra os recalques registrados por Silva (2010), a partir da instalação das placas superficiais nos alteamentos da célula AC-05.

Tabela 1 – Data de construção dos alteamentos

Alteamento	Data construção topo	Placa de recalque	Data instalação placa
1	ago/01	inclinômetros	-
2	dez/01	5.1/5.21	out/02
3	mar/02	5.2/5.22	ago/02
4	mar/02	5.3/5.23	ago/02
5	ago/02	5.4	mar/05
5	set/02	5.24	out/03
6	nov/02	5.5	out/04
6	dez/02	5.25	out/04
7	abr/03	5.6/5.26	jul/03
8	out/03	5.7/5.27	ago/04
9	mar/04	5.8/5.28	nov/04
10	ago/04	5.9/5.29	jan/06
11	jan/05	5.10/5.30	ago/06
12	jun/05	5.11/5.31	ago/06
13	jun/06	5.12/5.13/5.32/5.33	ago/06

Fonte: Adaptado de Silva 2010.

Figura 19 – Deslocamentos verticais a partir da data de início do monitoramento dos recalques, célula AC-05.

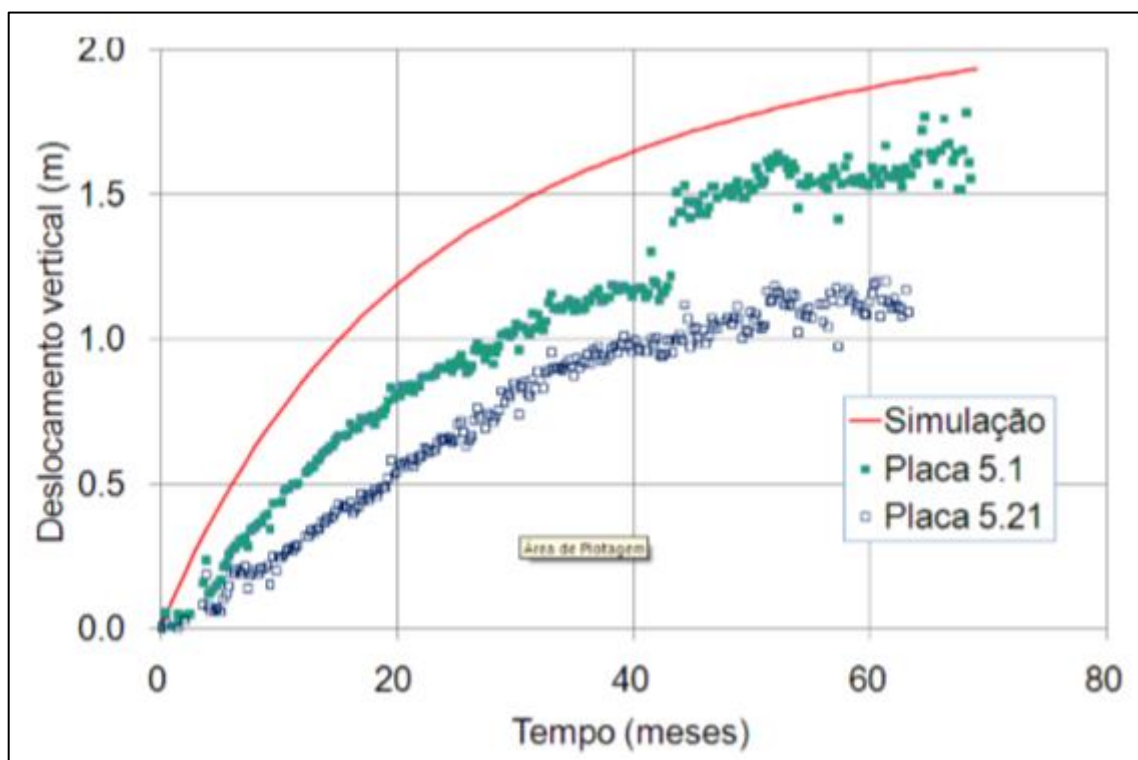


Fonte: Modificado de Silva, 2010.

Tomando como base o trabalho de Silva (2010), pode ser dizer que as placas de medição de recalques na célula AC-05 foram instaladas em todos os alteamentos, a exceção do 1º alteamento. Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os recalques registrados nas placas do 2º alteamento da AC-05, sendo desconsiderados os registrados dos recalques nos alteamentos suprajacentes (3º alteamento, ao 13º alteamento), isso em virtude de não encontrar dados dos deslocamentos verticais induzidos pelas camadas subjacentes, além de não ter a informação das espessuras dos alteamentos nas datas de instalação das placas.

Na Figura 20 encontram-se os recalques registrados nas placas 5,01 e 5,21, correspondentes ao 2º alteamento da célula AC-05.

Figura 20 – Deslocamentos verticais das placas 5.01 e 5.21, Aterro de Belo Horizonte.

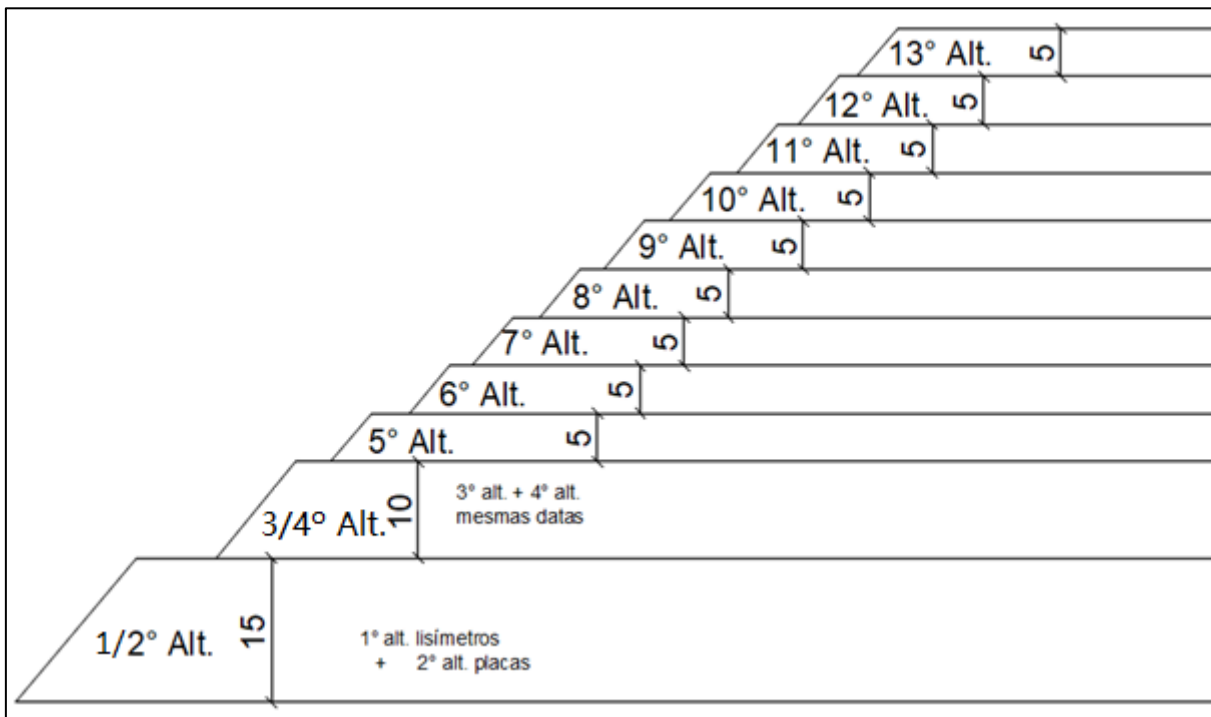


Fonte: Silva, 2010.

Com o propósito de aplicar os modelos de previsão de recalques para a situação de superposição de camadas de RSU, neste trabalho foi realizado uma adequação das espessuras dos alteamentos da célula AC-05. Dessa forma, os alteamentos 1 e 2 foram representados por apenas uma camada, isso devido à proximidade das datas de construção do topo e à falta de registros dos recalques

ocorridos no alteamento 1. Também para os alteamentos 3 e 4 optou-se por representá-los por uma única camada, já que as datas de operação e encerramento foram próximas. Para fins de desenvolvimento desta pesquisa, a Figura 21 mostra a nova disposição das camadas ajustadas da célula AC-05.

Figura 21 – Alteamentos e suas espessuras ajustadas na célula AC-05 do aterro de Belo Horizonte.



Fonte: Elaboração própria.

Para extração dos valores numéricos dos recalques das placas 5,01 e 5,21, apresentados por Silva (2010) em formato gráfico, utilizou-se nesta pesquisa a ferramenta GraphData 1.0, mesmo método utilizado para o aterro da Muribeca.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

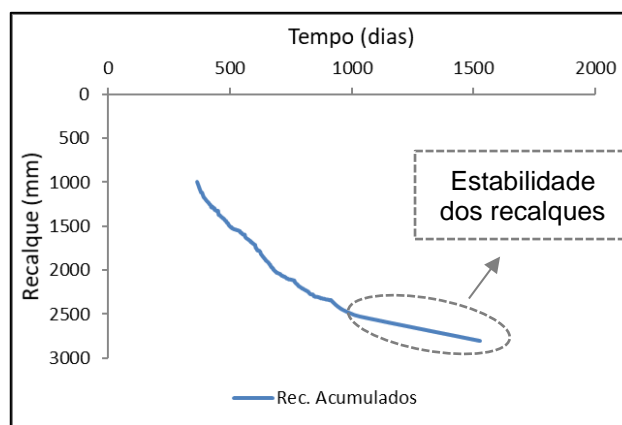
4.1 Registro e interpretação dos recalques monitorados

4.1.1 Aterro da Muribeca

É importante destacar que a espessura da Célula 4 definida por Melo (2003) corresponde à data de instalação das placas de recalques, aproximadamente um ano após a aplicação da cobertura definitiva. O autor verificou a espessura da célula executando um ensaio de SPT, registrando um valor de 15 metros.

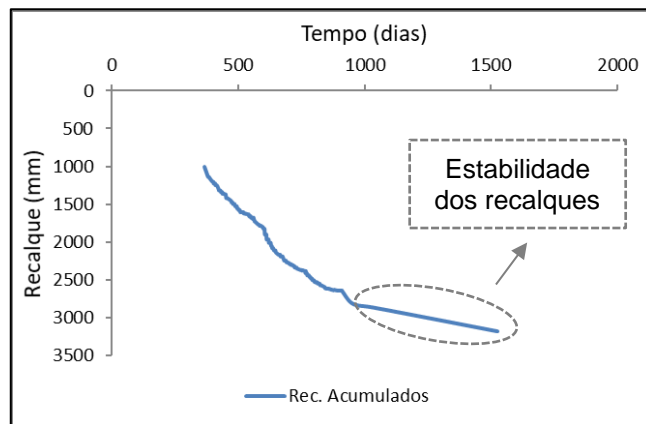
Com o intuito de aplicar os modelos de previsão de recalques a partir do final da construção da Célula 4, neste trabalho optou-se por fazer um ajuste dos recalques registrados por Melo (2003). Conseqüentemente, entendendo que ocorreram recalques superficiais na Célula 4 no intervalo das datas de aplicação da camada de cobertura (1998) e da instalação das placas superficiais (1999), foi necessário adequar a espessura da célula para o final da construção do topo, ajustar também os recalques acumulados. Para isso, acrescentou-se 1000 mm nos deslocamentos registrados por Melo (2003). O valor acrescentado é proporcional à magnitude dos deslocamentos medidos pelo autor no primeiro ano de monitoramento das placas instaladas na Célula 4 (1999 a 2000). A partir disso, as Figuras 22 a 25 apresentam os recalques ajustados a partir do final da construção da Célula 4 (placas 6, 7, 10 e 11), os quais serão utilizados no desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 22 – Recalques ajustados na placa 6 da Célula 4, no aterro da Muribeca, final de construção.



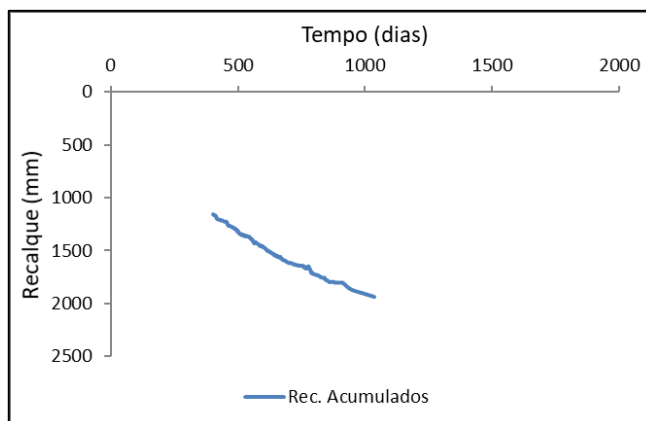
Fonte: Elaboração própria.

Figura 23– Recalques ajustados na placa 7 da Célula 4 no aterro da Muribeca, final da construção.



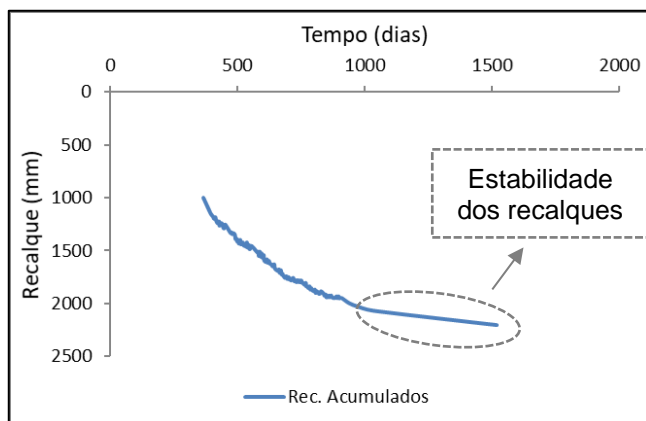
Fonte: Elaboração própria.

Figura 24 – Recalques ajustados na placa 10 da Célula 4 no aterro da Muribeca, final da construção.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 25 – Recalques ajustados na placa 11 da Célula 4 no aterro da Muribeca, final da construção.



Fonte: Elaboração própria.

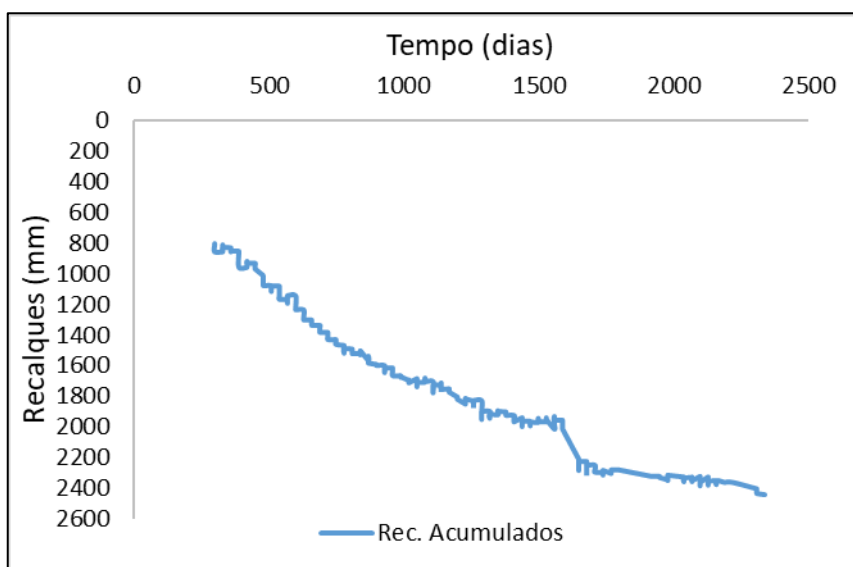
Pelo observado nas Figuras 22 a 25, os comportamentos das curvas de recalques se diferenciam em dois trechos, os recalques medidos com as placas 6, 7 e 11, apresentam um comportamento crescente até chegarem a um trecho mais suavizado com a horizontal, enquanto que a placa 10 só apresenta o trecho crescente. O monitoramento das placas, conforme Melo (2003), se deu por um período de junho de 1999 até agosto de 2002, porém durante o intervalo de março de 2001 até agosto de 2002, houveram problemas operacionais, em que não foram feitas as leituras dos valores de recalque. Observando a Figura 15, onde é apresentado o gráfico dos recalques monitorados para a Célula 4, observa-se que a placa 10 teve recalques registrados apenas até março de 2001, o que explica o comportamento dos recalques acumulados na Figura 24, onde a placa 10 não apresenta o trecho mais suavizado conforme as demais placas citadas.

4.1.2 Aterro de Belo Horizonte

O monitoramento dos recalques no 2º alteamento da célula AC-05, iniciaram em outubro de 2002 (data de instalação das placas), aproximadamente 300 dias após a data final da construção do topo da camada de cobertura (dez/20). Silva (2010), a partir de um estudo de retro análise estimou que o recalque acumulado entre as datas de construção do topo e da instalação das placas, no 2º alteamento, corresponde a 800 milímetros. Com base nessas informações, nas Figuras 26 e 27 são mostrados os recalques ajustados a partir do final da construção do alteamento.

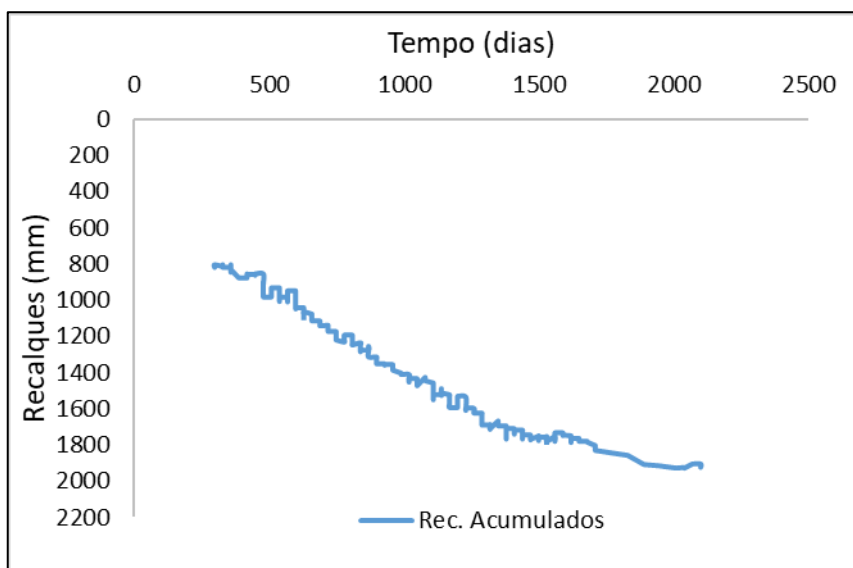
Conforme visualizado nas Figuras 26 e 27, as curvas de recalques ajustadas do 2º alteamento da célula AC-05, apresentam comportamentos inicialmente crescentes e, a partir de um determinado tempo há uma tendência mais suavizada da curva. Tal comportamento também é observado no aterro da Muribeca, o que nos conduz ao entendimento que após dado período as deformações diminuem consideravelmente até apresentarem menores taxas de recalques em função do tempo.

Figura 26 –recalques ajustados na placa 5.01 da AC-05, aterro de Belo Horizonte, final da construção.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 27 –Recalques ajustados para a placa 5.21 da AC-05, aterro de Belo Horizonte, final da construção.



Fonte: Elaboração própria.

4.2 Aplicação e validação do método Acoplado de Tapahuasco (2009)

4.2.1 Aterro da Muribeca

Após extraídos os dados da Célula 4 do aterro, iniciou-se a aplicação das equações utilizadas e propostas por Tapahuasco (2009). Dessa forma, na Tabela 2 são apresentados os dados de entrada para aplicação das equações 5, 7 e 8 (Item 2.2.6).

Tabela 2 – Base de dados do aterro da Muribeca, para aplicação do método acoplado de Tapahuasco para as placas 6, 7, 10 e 11.

Base de Dados	
Altura Inicial prevista (H ₀) (mm) (Melo, 2003)	16000
% massa orgânica inicial (Melo, 2003)	60%
Massa específica org. (Monteiro, 2003)	1
Deformação orgânica total devido à biodegradação (Mariano, 2007)	26%
C' _c (Mariano, 1999)	0,4
γ_{solto} (kN/m ³)	7
γ_{compact} (kN/m ³)	11
h (m) (Melo, 2003)	2
CAMADA DE COBERTURA	
$\gamma_{\text{entulho obra}}$ (kN/m ³)	14,7
h (m) (Melo, 2003)	0,4

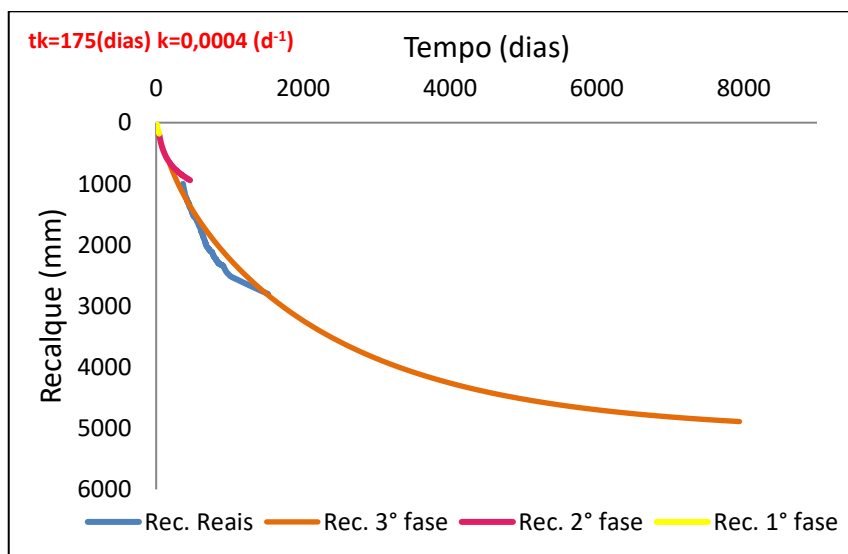
Fonte: Elaboração própria.

Na simulação da 1ª fase (Tabela 2), utilizou-se o coeficiente de deformação de compressão primária proposto por Mariano (1999), igual a 0,40 e, como peso específico inicial do RSU compactado, o valor de 11 kN/m³. Além disso, a partir do ajuste global de correlação (1ª fase, 2ª fase e 3ª fase) estimou-se que o tempo de duração média da 1ª fase ocorre até 40 dias após o encerramento da Célula 4. Seguidamente, na simulação da 2ª fase de recalques, utilizou-se a equação 7 (Especificado no Item 2.2.6). Para isso, considerou-se a porcentagem de material orgânico gravimétrico igual a 60%, valor representativo para os RSU dispostos no aterro Muribeca (Melo, 2003). Na simulação da 3ª fase, inicialmente inseriu-se a magnitude da deformação orgânica total devido a biodegradação, igual a 0,26, a qual é proporcional à composição volumétrica do RSU compactado no aterro (26 % de fração orgânica). Já os parâmetros de constante de degradação cinética (k) e tempo

de início da bioconversão (t_k) foram estimados através de “tentativa e erro” até encontrar um ajuste apropriado entre as curvas de recalques estimadas e as curvas dos recalques registrados. Com o intuito de estimar a possível magnitude dos recalques por um período mais longo na célula 04, os recalques simulados para a 3ª fase foram estendidos para um período de tempo maior se comparados aos recalques registrados, assim sendo estimados até o ano de 2020. Dessa forma foram estimados recalques para as placas 6, 7, 10 e 11 até o mês de dezembro do ano de 2020, os quais correspondem a 4900mm, 5000 mm, 4800 mm, 4400 mm respectivamente. Analisando em termos de porcentagem os recalques estimados com a espessura inicial (16000 mm), obteve-se os valores de 30,73%, 31,15%, 29,96% e 27,60% de recalques para as placas 6, 7, 10 e 11 durante o período estudado.

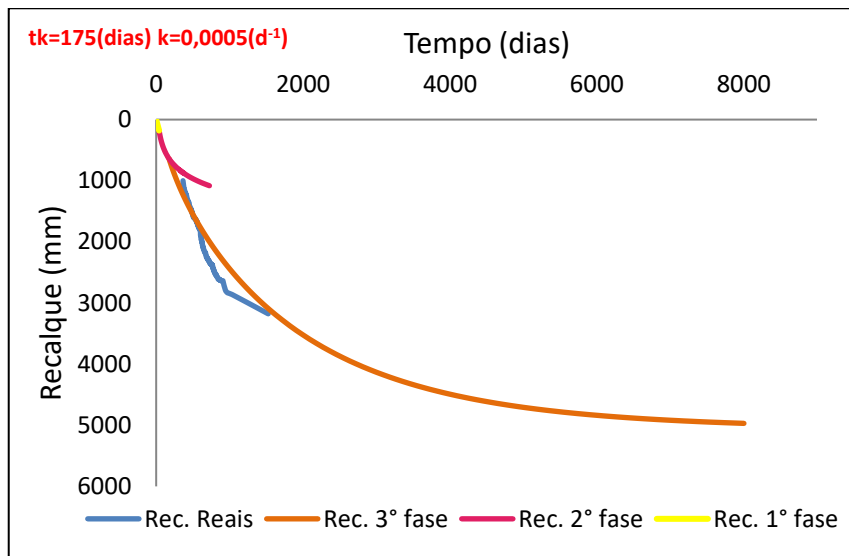
Nas Figuras 28 a 31 são mostradas as curvas de correlação entre os recalques registrados e os recalques estimados.

Figura 28 – Correlação entre recalques estimados pelo modelo acoplado de Tapahuasco e recalques registrados, placa 6 da Célula 4 do aterro da Muribeca.



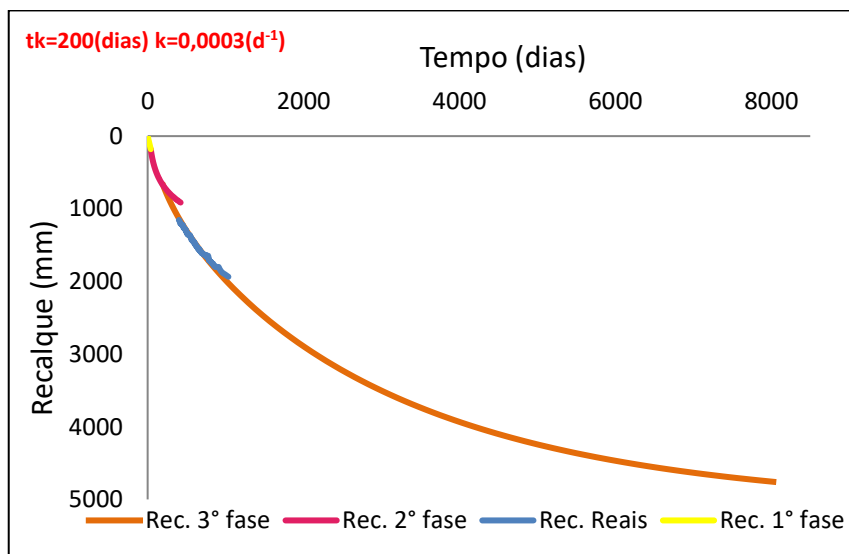
Fonte: Elaboração própria.

Figura 29 – Correlação entre os recalques estimados pelo método acoplado de Tapahuasco e recalques registrados, placa 7 da Célula 4 do aterro da Muribeca.



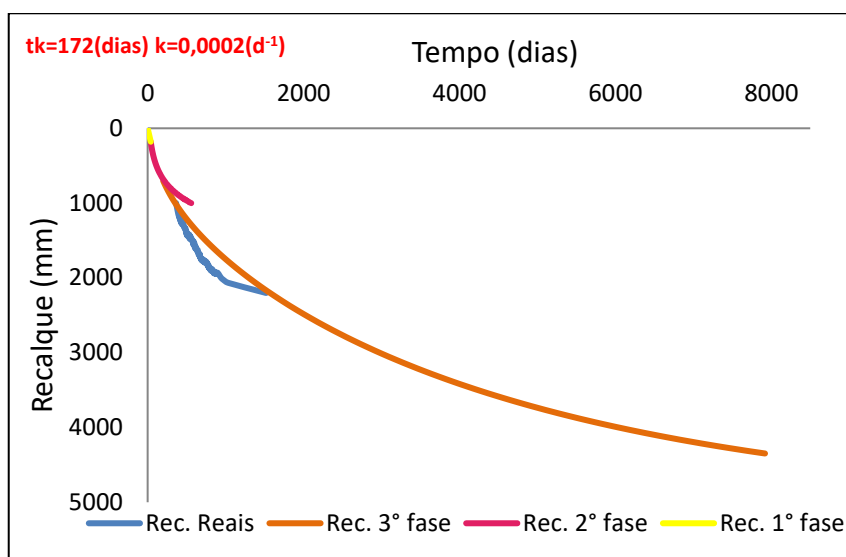
Fonte: Elaboração própria.

Figura 30 – Correlação entre os recalques estimados pelo método acoplado de Tapahuasco e recalques registrados, placa 10 da Célula 4 do aterro da Muribeca.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 31 – Correlação entre os recalques estimados pelo modelo acoplado de Tapahuasco e recalques registrados, placa 11 da Célula 4 do aterro da Muribeca.



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 3 apresentam-se os valores dos parâmetros t_k e k para as placas 6, 7, 10 e 11.

Tabela 3 – Parâmetros t_k e k utilizados no ajuste das curvas de recalques estimados para as placas 6, 7, 10 e 11, Célula 4 do aterro da Muribeca.

Placa	t_k (dias)	k (d ⁻¹)
6	175	0,0004
7	175	0,0005
10	200	0,0003
11	172	0,0002

Fonte: Elaboração própria.

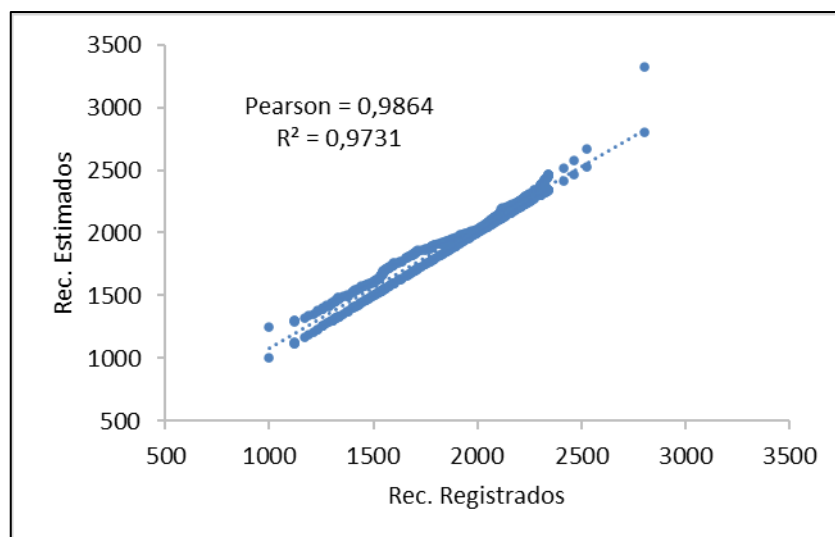
Pelo observado nas Figuras 28 a 31 e na Tabela 3, o ajuste de correlação gráfico mostra que tempo da bioconversão “ t_k ” inicia entre 172 a 200 dias após o final da construção da Célula 4. Já a constante de degradação cinética da primeira ordem “ k ”, apresenta valores entre 0,0002 a 0,0005 dia⁻¹. Além disso, pode-se dizer que os valores de k encontrados na Célula 4 do aterro da Muribeca, a exceção da placa 11, estão inseridos dentro da faixa de valores (0,0003 a 0,0076 dia⁻¹) encontrados por Tapahuasco (2009). Já os t_k determinados na Célula 4, se comparados aos lisímetros anaeróbicos analisados por Tapahuasco (2009), mostram valores superiores aos determinados no LS-01 (90 dias) e inferiores ao lisímetro L1-Alcantará (317 dias). É

importante destacar que Tapahuasco aplicou o modelo em menor escala, em lisímetros, enquanto que no presente trabalho aplicou-se para células de aterros sanitários em escala real, o que justifica a variação entre os valores encontrados para os parâmetros k e t_k .

Com o intuito de verificar a aproximação entre os recalques estimados vs. os registrados, aplicou-se os ajustes de correlação linear pelos métodos de Pearson e Mínimos Quadrados. O coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida de associação linear entre variáveis quantitativas (Filho e Junior, 2009). Já o método dos Mínimos Quadrados, escolhe os parâmetros de um modelo empírico para minimizar a soma dos quadrados das distâncias entre cada ponto dado e o plano representado pela equação do modelo (Montgomery e Runger, 2018).

Na Figura 32, para o tempo que compreendeu o monitoramento dos recalques, é mostrada de forma gráfica o ajuste de correlação linear pelo método dos Mínimos Quadrados entre os recalques estimados e recalques medidos na Placa 6, juntamente com o valor encontrado para a correlação de Pearson. Já na Tabela 4 são apresentados para todas as placas superficiais (Placa 6, Placa 7, Placa 10 e Placa 11) os resultados de ajustes de correlação linear pelo método de Pearson e R^2 .

Figura 32 – Ajuste de Correlação Linear pelo método dos Mínimos Quadrados, Rec. Registrados vs. Rec. Estimados para a Placa 06, Célula 4 do aterro da Muribeca.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4 – Ajuste de correlação entre os coeficientes de Pearson e R² para as placas 6, 7, 10 e 11 (para diferentes tk e k), Célula 4 do aterro da Muribeca.

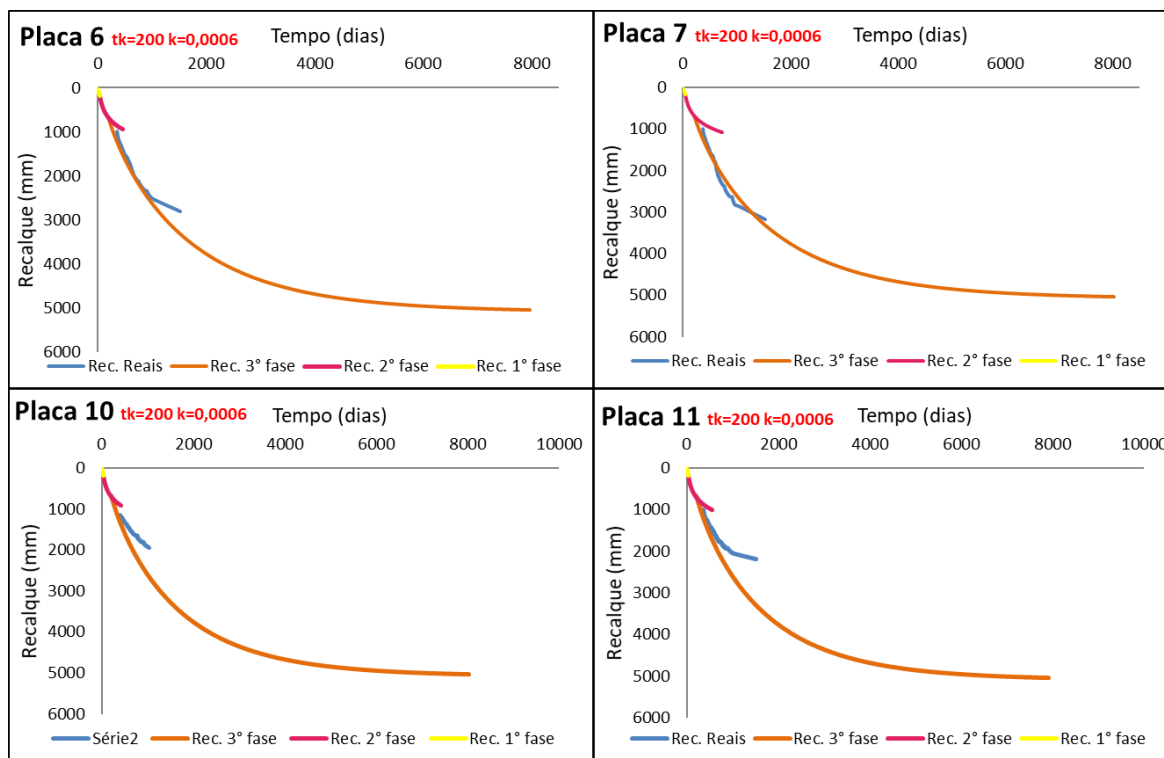
Placa	Método	
	Pearson	R ²
6	0,9572	0,9161
7	0,9456	0,8942
10	0,9972	0,9944
11	0,8538	0,7289

Fonte: Elaboração própria.

Os dados de correlação apresentados demonstram que as placas 6, 7 e 10 tiveram um melhor ajuste que a placa 11, a mesma obteve uma correlação entre 0,72 e 0,85, abaixo das demais placas que se mantiveram entre 0,89 e 0,99.

Com o intuito de analisar o comportamento dos recalques para valores similares de tk e k, em todas as placas estudadas da Célula 4, realizou-se um novo ajuste de correlação entre os recalques estimados e registrados. Tais ajustes são apresentados na Figura 33 e Tabela 5.

Figura 33 – Recalques estimados pelo método acoplado de Tapahuasco para as placas 6, 7, 10 e 11, Célula 4 do aterro da Muribeca.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5 – Ajuste de correlação entre os coeficientes de Pearson e R^2 para as placas 6, 7, 10 e 11 (para mesmos t_k e k), Célula 4 do aterro da Muribeca.

Placa	Método	
	Pearson	R^2
6	0,9864	0,9731
7	0,9775	0,9555
10	0,7371	0,5433
11	0,8579	0,736

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 33 apresenta os recalques simulados com o método acoplado de Tapahuasco (2009) para as placas 6, 7, 10 e 11, onde o ajuste de correlação apresenta valores médios de t_k e k igual a 200 dias e $0,0006 \text{ dia}^{-1}$ respectivamente. Os recalques estimados para este caso até no ano de 2020 (placas 6, 7, 10 e 11) foram 5046 mm, sendo esse valor igual para todas as placas, devido a ter os mesmos dados de entrada e os mesmos parâmetros de t_k e k .

Na Tabela 5 são apresentados para as placas 6, 7, 10 e 11 os resultados do ajuste de correlação linear pelo método de Pearson e R^2 . Dessa forma, os valores das correlações feitas entre os recalques monitorados na Célula 4 e os recalques estimados pelo modelo de Tapahuasco, mostram resultados bastante próximos, porém como já era esperado quando observado os gráficos das placas 10 e 11 na Figura 33, as mesmas não obtiveram um ajuste adequado (correlação abaixo de 0,75) como nas placas 6 e 7 (correlação acima de 0,95).

4.2.2 Aterro de Belo Horizonte

A aplicação do método proposto por Tapahuasco (2009) para o aterro de Belo Horizonte foi realizada para as duas primeiras placas instaladas no segundo alteamento da célula AC-05, Placa 5.01 e Placa 5.21, conforme Item 2.2.6. Após compilação da base de dados do aterro, necessários para aplicação do método (Tabela 3), foi realizada a simulação de ajuste entre recalques estimados e recalques reais. Para isso foram procurados de forma iterativa valores numéricos de “ t_k ” (tempo de início de bioconversão) e “ k ” (constante de degradação cinética), até obter um ajuste gráfico apropriado, conforme visualizados nas Figuras 32 e 33. A Tabela 6

apresenta os dados usados como base para aplicação do método de Tapahuasco (2009).

Tabela 6 – Base de dados do aterro de Belo Horizonte, para aplicação do modelo Tapahuasco (2009) para as placas 5,01 e 5,21, célula AC-05.

Base de dados	
Altura Inicial (H ₀) (m) (Silva,2010)	15000
% massa orgânica inicial (Simões et al., 2004)	65,46
Massa específica org. (Silva, 2010)	1
Deformação orgânica total devido à biodegradação	0,2397
Tempo de início da bioconversão tk (dias)	0
Constante de degradação cinética k*	0,0002/0,0001
C' _c (%Morg próx. de Muribeca Cc iguais)	0,4
γsolto (kN/m ³)	7
γcompac (kN/m ³)	10
h (m) (Silva, 2010)	15
CAMADA DE COBERTURA	
γ cobertura (kN/m ³)	18
h (m) (Silva, 2010)	0,4

*constante k para as placas 5.01 e 5.21 respectivamente.

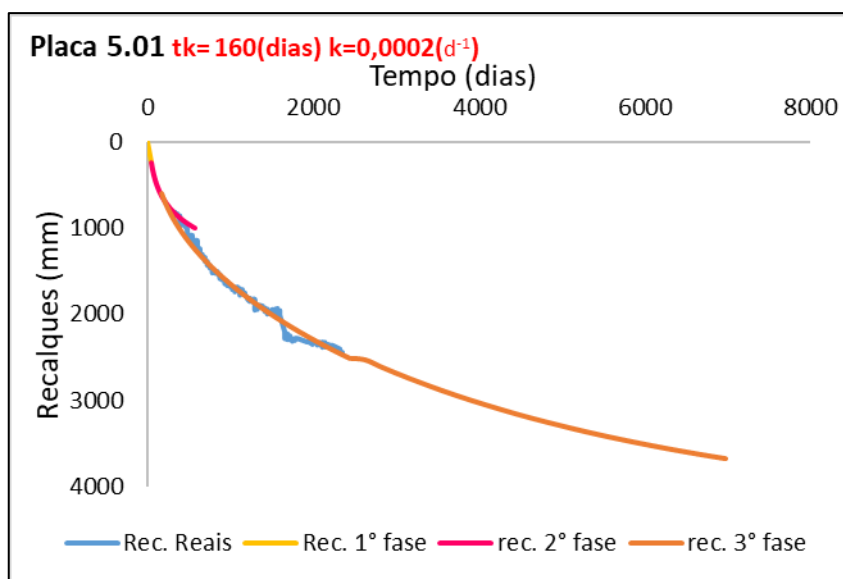
Fonte: Elaboração própria.

Considerando que o aterro Belo Horizonte e Muribeca, apresentaram teores de orgânicos próximos, 60% e 65,46% respectivamente, na simulação da 1ª fase (Tabela 2) da célula AC-05 adotou-se como coeficiente de deformação de compressão primária o valor igual a 0,40, sendo proposto por Mariano (1999) para o aterro da Muribeca. Dessa forma utilizou-se, o critério para escolha do “C'_c” em função do teor orgânico dos RSU dispostos. Além disso, estudos feitos por Catapreta & Simões (2007) mostram que o peso específico compactado do RSU no aterro de Belo Horizonte, varia entre 7kN/m³ e 11kN/m³. Para esta pesquisa adotou-se como peso específico inicial do RSU compactado o valor de 10 kN/m³. A partir do ajuste global de correlação (1ª fase, 2ª fase e 3ª fase) estimou-se que o tempo de duração média da 1ª fase ocorre até 50 dias após o encerramento da célula AC-05. Em seguida, na simulação da 2ª fase dos recalques, utilizou-se a equação 7 (Sugerido no Item 2.2.6), sendo para isso, considerado a porcentagem de material orgânico gravimétrico igual a 65,46%, valor representativo para os RSU dispostos no aterro de Belo Horizonte (Simões, 2004). Na simulação da 3ª fase, inicialmente inseriu-se a magnitude da deformação orgânica total devido a biodegradação, igual a 0,24, a qual é proporcional

à composição volumétrica do RSU compactado no aterro (24% de fração orgânica). A composição volumétrica do aterro de Belo Horizonte não foi encontrada nas fontes pesquisadas, com isso o parâmetro deformação orgânica total utilizado, foi do aterro experimental de Belo Horizonte, estudado pelos autores Catapreta & Simões (2007), situado no mesmo local do aterro em estudo. Já os parâmetros de constante de degradação cinética (k) e tempo de início da bioconversão (t_k) foram estimados através de “tentativa e erro”. Do mesmo modo que o aterro da Muribeca, os recalques simulados da 3ª fase para o aterro de Belo Horizonte foram estendidos para um período de tempo maior se comparados aos recalques registrados, assim sendo estimados até o ano de 2020.

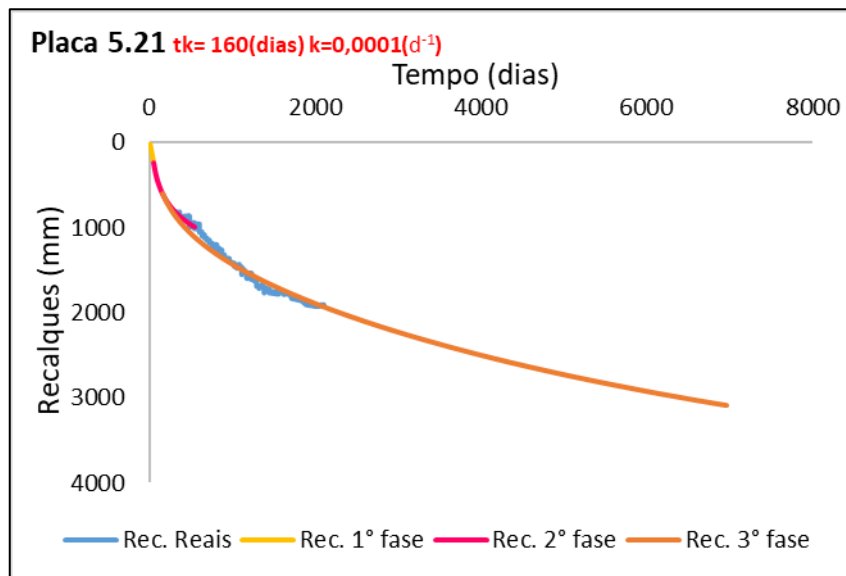
As Figuras 34 e 35 apresentam os recalques estimados pelo método de Tapahuasco (2009) para as placas 5,01 e 5,21.

Figura 34 – Gráfico dos recalques estimados para o modelo acoplado de Tapahuasco para a placa 5.01, célula AC-05 do aterro de Belo Horizonte.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 35 – Gráfico dos recalques estimados para o modelo acoplado de Tapahuasco para a placa 5.21, célula AC-05 do aterro de Belo Horizonte.

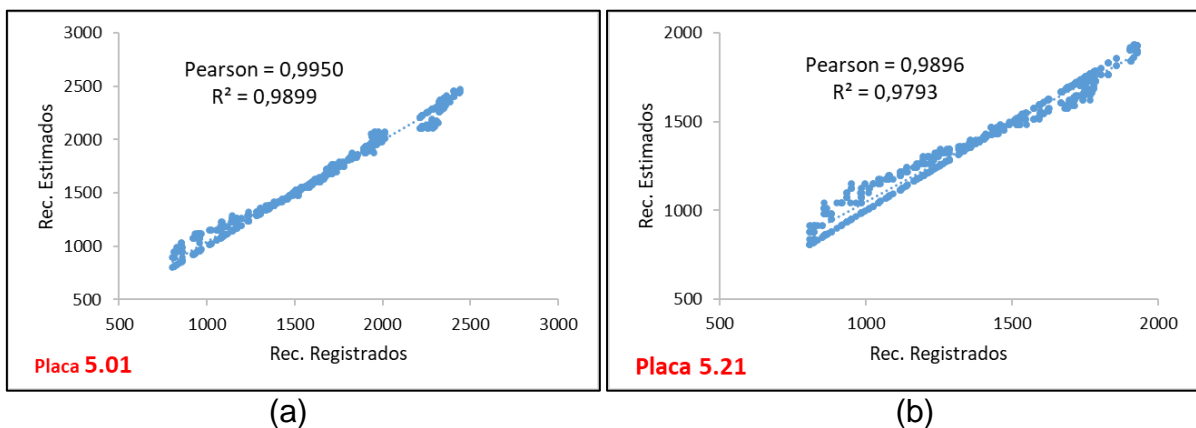


Fonte: Elaboração própria.

A fim de verificar a aproximação entre os recalques monitorados e os recalques estimados, foram aplicados os ajustes de correlação linear pelo método de Pearson e Método dos Mínimos Quadrados.

A Figura 36 apresenta o ajuste de correlação linear pelo Método dos Mínimos Quadrados entre recalques estimados e recalques monitorados na placa 5.01, e a correlação de Pearson.

Figura 36 – Ajuste de Correlação Linear pelo método dos Mínimos Quadrados, Rec. Registrados vs. Rec. Estimados para aa Placa 5.01 e 5.21, aterro de Belo Horizonte.



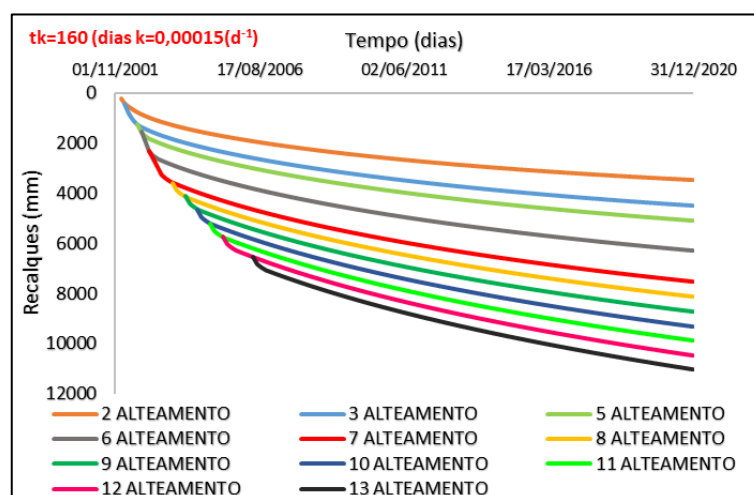
Fonte: Elaboração própria.

As Figuras 34 e 35 apresentam os recalques simulados com o método acoplado de Tapahuasco (2009) para as placas 5.01 e 5.21 onde o ajuste de correlação apresenta valores de t_k de 160 dias, ambas as placas, e k igual 0,0002 (placa 5.01) e 0,0001 (placa 5,21) dia^{-1} . Os recalques estimados para as placas até no ano de 2020 foram aproximadamente, 3700 mm para a placa 5,01 e 3100 mm para a placa 5,21.

A Figura 36 mostra os valores de correlação linear encontrados, para a placa 5.01 (a) para o método de Pearson foi de 0,9950, enquanto pelo Método dos Mínimos Quadrados foi 0,9899. Já para a placa 5.21 (b) os valores obtidos foram 0,9896 e 0,9793, respectivamente.

Posteriormente fez-se as médias dos parâmetros, tempo de início de bioconversão (t_k) e constante de degradação cinética (k) encontrados nas placas 5.01 e 5.21, para posterior aplicação nas demais camadas. Dessa forma poder simular os recalques em todos os alteamentos da célula AC-05, conforme ajuste de espessuras apresentado na Figura 21. A média encontrada para os parâmetros t_k e k , foram respectivamente, 160 dias e 0,00015, valores estes aplicados em todos os alteamentos da célula, isso a fim de analisar individualmente o comportamento dos recalques de cada uma das camadas, considerando o efeito das camadas inferiores. Assim, somando-se os efeitos das camadas subjacentes para se obter o comportamento mais próximo do comportamento real dos recalques. Esse comportamento pode ser observado na Figura 37.

Figura 37 – Gráfico dos recalques estimados para o modelo acoplado de Tapahuasco para todos os alteamentos da célula AC-05 do aterro de Belo Horizonte.



Fonte: Elaboração própria.

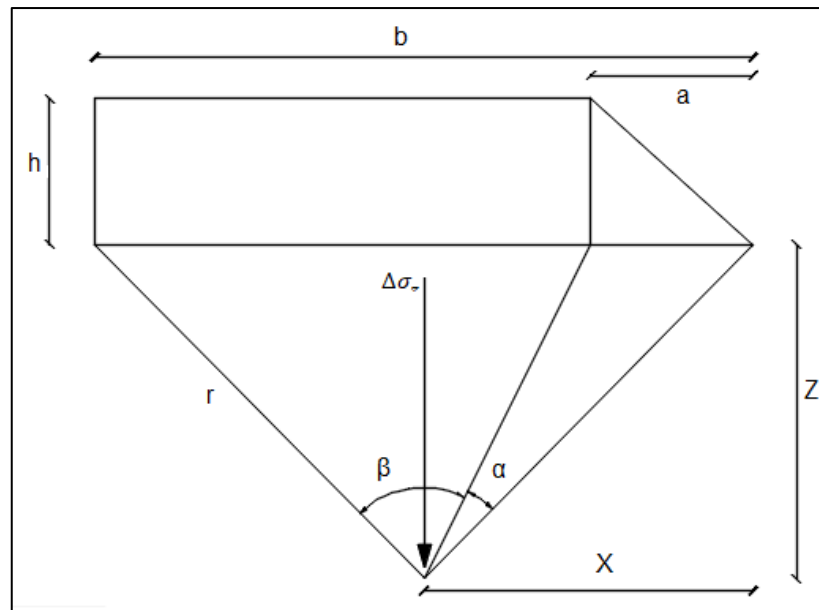
Está demonstrado na Figura 37 demonstra o comportamento dos recalques estimados pelo modelo de Tapahuasco (2009) para cada alteamento da célula AC-05. Cada camada foi analisada individualmente, sem considerar o acréscimo de carga de camadas superiores, apenas os efeitos das camadas inferiores, sendo somados esses valores em cada alteamento. Cada placa foi inserida com sua data de início de monitoramento, considerando as 3 fases de recalques. O comportamento foi de acordo com o esperado, inicialmente uma curva mais acentuada por um curto período de tempo, que com o passar do tempo o comportamento das curvas é mais sutil. O recalque na última camada para o ano de 2020 foi de 11047 mm.

Devido à disposição dos resíduos se dar por camadas, uma sobre a outra e, cada uma com sua data de início e final de disposição de resíduos, foi necessário considerar o acréscimo de carga que uma camada causa ao ser disposta acima de outra. Assim é importante considerar que tenham ocorrido acréscimos de recalques conforme foram dispostos os resíduos das camadas. Em razão disso, foi realizada a simulação dos recalques provocados pela superposição das camadas suprajacentes. Para tal, utilizou-se a equação 9 na determinação dos valores de acréscimos de carga, na sequência calcularam-se os recalques primários representados pela 1ª fase de deformação (Equação 5). Tais resultados podem ser observados na Tabela 7. Foi analisada camada por camada conforme modelo apresentado na Figura 38. Os dados de entrada como peso específico da camada deformada, peso específico do carregamento e coeficiente de compressão primária, foram 14kN/m³, 10kN/m³ e 0,3, respectivamente. Esses últimos valores foram utilizados para todas as camadas e considerados como constante, podendo ser aprimorado em trabalhos futuros, já que se acredita que pelo menos o peso específico dos RSU aumenta conforme os recalques mecânicos ocorridos. Estão apresentados na Figura 39, apresenta os resultados da aplicação do método Tapahuasco na Célula AC-05, para a condição aplicação de sobrecargas nas 3 fases de deformação.

A seguir a Equação 9 desenvolvida e proposta a partir da solução de Boussinesq (Das, 2008), utilizada para estimativa de acréscimo de cargas.

$$\Delta\sigma_z = \frac{p}{\pi} \left[\beta + \frac{x}{a} \alpha - \frac{z}{r^2} (x - b) \right] \quad (9)$$

Figura 38 – Representação gráfica da teoria de adensamento.



Fonte: Elaboração própria.

Onde:

b: Comprimento total da camada

p: Carga devido a espessura

β : Ângulo entre o vértice do retângulo e do triângulo

α : Ângulo entre os vértices do triângulo

x: Distância do ponto inicial da camada até o centro da camada subjacente

a: Comprimento da face inclinada da camada

z: Distância entre o ponto central da camada subjacente até a base onde está aplicada a camada superior

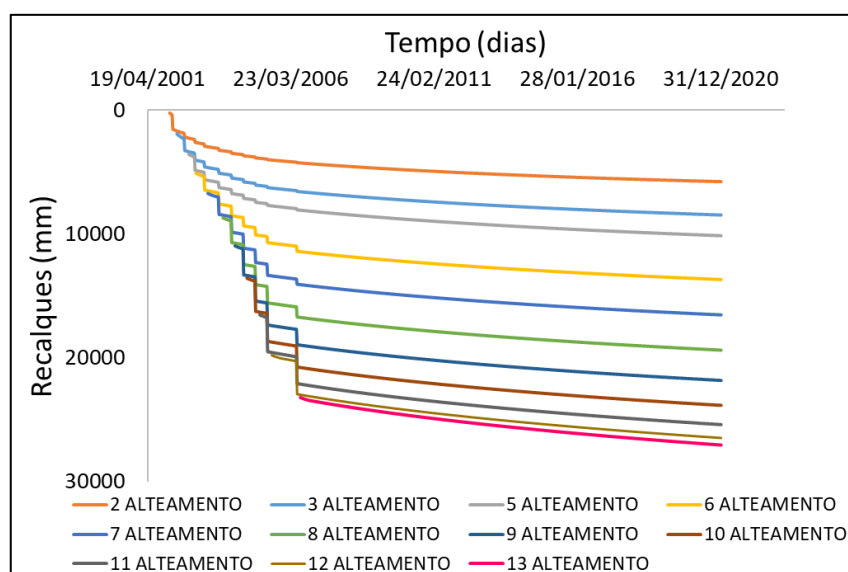
r: raio gerado do ponto central da camada subjacente até o ponto extremo da camada superior.

Tabela 7 – Valores de recalques devido à aplicação de cargas para cada alteamento, célula AC-05 do aterro de Belo Horizonte.

Alteamento	Data de implantação									
	mar/02	ago/02	nov/02	abr/03	out/03	mar/04	ago/04	jan/05	jun/05	jun/06
	Alt. 3 /4	Alt. 5	Alt. 6	Alt. 7	Alt. 8	Alt. 9	Alt. 10	Alt. 11	Alt. 12	Alt. 13
1/2	1126,2	291,3	222,7	176,5	142,7	115,2	90,5	68,5	49,6	34,8
3/4		610,1	326,2	217,6	160,1	122,6	92,6	66,3	44,7	30,1
5			500,0	194,5	117,9	83,4	63,2	49,5	38,0	27,9
6				495,5	475,1	452,7	426,8	398,5	362,9	319,2
7					495,5	475,1	453,0	427,5	397,9	362,2
8						495,6	474,5	452,8	427,1	397,5
9							494,9	475,1	452,2	426,5
10								495,5	474,6	451,5
11									495,1	473,9
12										494,3

Fonte: Elaboração própria.

Figura 39 – Gráfico dos recalques estimados somados a sobrecarga dos alteamentos do aterro de Belo Horizonte para o modelo acoplado de Tapahuasco.



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 7, são apresentados os valores de recalques devido à aplicação de cargas para cada alteamento. Foram necessários ajustes no parâmetro tensão vertical efetiva (σ_o) para cada uma das espessuras das camadas, pois o alteamento 1/2 possui uma espessura de 15 metros, enquanto que o 3/4 alteamento possui 10 metros, e os demais alteamentos, 5 metros de espessura cada, o que se pode observar na Figura 21, já apresentada neste estudo.

Na Figura 39 apresenta-se o resultado da combinação dos recalques estimados a partir do modelo proposto por Tapahuasco (2009), mostrado na Figura 37, com os valores de sobrecargas geradas pela aplicação dos alteamentos apresentados na Tabela 7. Esta combinação gerou o gráfico de recalques estimados acrescidos das sobrecargas que cada camada sofreu na aplicação dos alteamentos superiores até o ano de 2020. Para esta simulação o recalque máximo estimado foi de 27000 mm.

Para fins de comparação dos valores de recalques estimados com os recalques reais que ocorreram na célula AC-05 até o ano 2020, tentou-se entrar em contato com os responsáveis do aterro Belo Horizonte, infelizmente não se teve sucesso.

4.3 Aplicação modelos de Bjarngard e Edgers (1990) e Meruelo (1995)

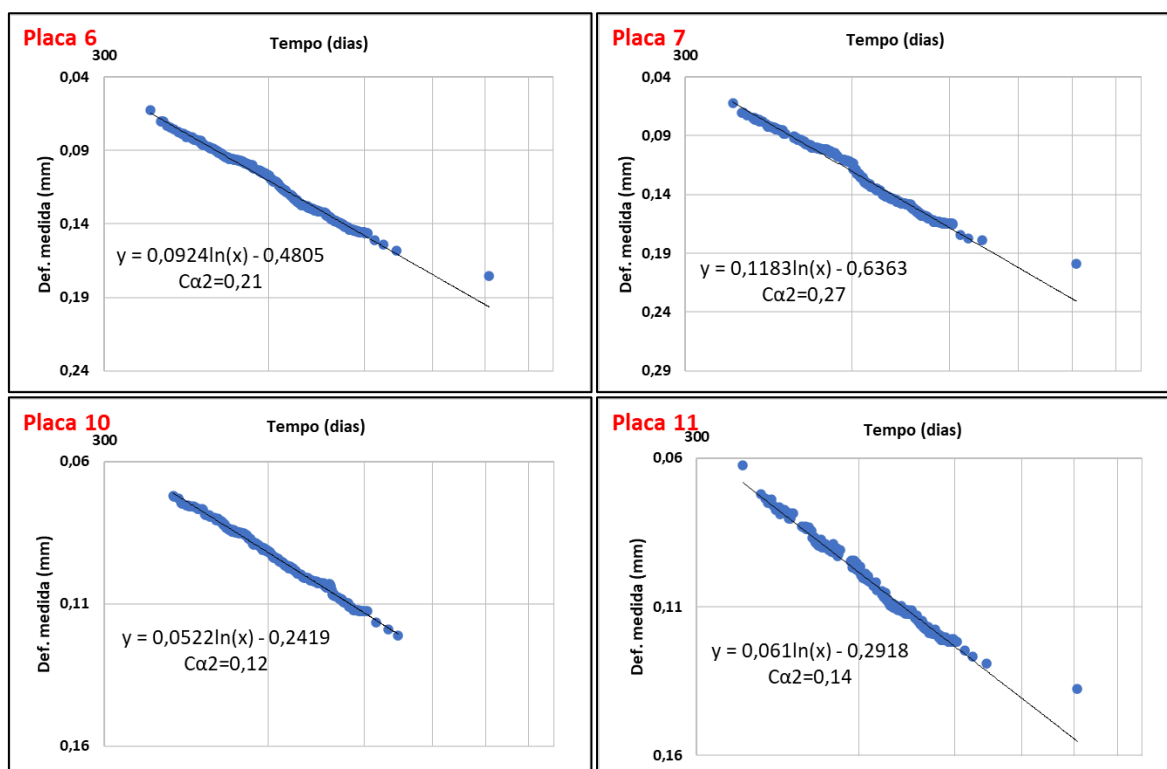
Para este trabalho, com o intuito de complementar o estudo de previsão dos recalques em maciços sanitários, aplicaram-se também as equações propostas Bjarngard e Edgers (1990) e Meruelo (1995). Alguns autores (Teixeira, 2015; Melo, 2003; Tapahuasco, 2005) comentaram que tais modelos mostram-se satisfatórios nos estudos de retro análise entre recalques estimados e recalques registrados.

4.3.1 Aplicação modelo de Bjarngard e Edgers (1990)

4.3.1.1 Aterro da Muribeca

Conforme orientações do método em análise, primeiramente foram representados graficamente as deformações medidas em função do logaritmo de tempo, com o propósito de determinar os parâmetros de deformação ($C\alpha_1$, $C\alpha_2$). Tais representações gráficas são apresentadas na Figura 40.

Figura 40 – Gráficos das deformações medidas em função do logaritmo de tempo para as placas 6, 7, 10 e 11, Célula 4 do aterro da Muribeca.



Fonte: Elaboração própria.

Pelo observado na Figura 40, as curvas de deformação pelo logaritmo de tempo mostram um comportamento linear único, implicando na determinação de um só coeficiente de inclinação. Considerando que o monitoramento dos recalques nas placas 6, 7, 10 e 11, iniciaram 1 ano após aplicação da cobertura final da Célula 4, pode-se dizer que os coeficientes de inclinação correspondem o “Cα2”, envolvendo deformações da terceira fase. Em razão disso não foi possível fazer uma retro análise dos recalques correspondentes a primeira e segunda fase do método Bjarngard e Edgers (1990), sendo feita apenas a retro análise para a equação da terceira fase de deformações.

Os coeficientes Cα2 determinados para as placas 10 e 11 a partir da equação da reta (Figura 41), não geraram um ajuste de correlação apropriado entre os recalques estimados e os recalques monitorados. Devido a isso, para as Placas 10 e 11 foi necessário adotar valores de Cα2 em função de “tentativa e erro” até que o comportamento do gráfico estimado pelo modelo fosse próximo ao comportamento do gráfico monitorado.

O parâmetro t_2 foi adotado igual 365 dias, isso devido ao tempo entre o encerramento da célula e o início do monitoramento dos recalques, não sendo possível estimar numericamente o t_2 , já que os recalques monitorados apresentarem apenas a terceira fase das deformações. Na tabela 8 estão apresentados os parâmetros utilizados para cada placa.

Tabela 8 – Dados para aplicação do modelo para placas 6, 7, 10 e 11 do aterro da Muribeca.

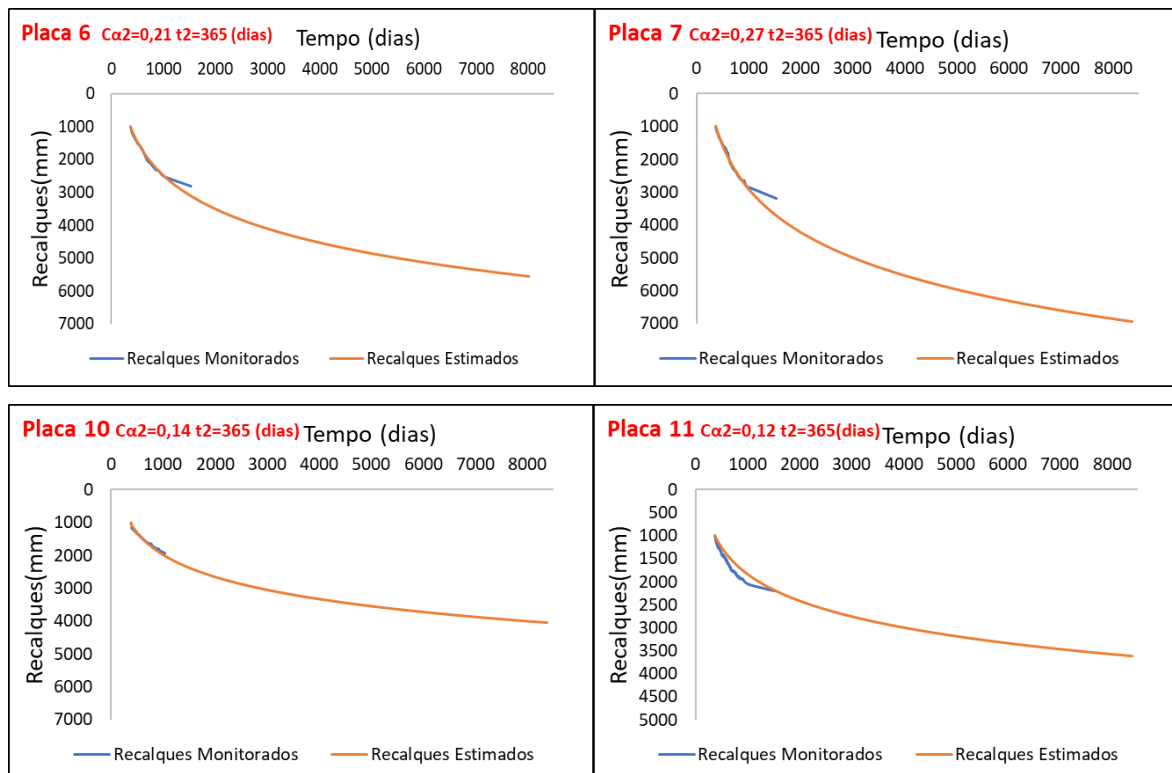
BASE DE DADOS					
PLACAS		6	7	10	11
Recalque estimado nos primeiros 365 dias (mm)	(mm)	1000	1000	1000	1000
Altura inicial prevista (mm) (Melo, 2003)	H:	16000	16000	16000	16000
Coef. de comp. secundária de longo prazo	α_2 :	0,21	0,27	0,14*	0,12*
Tempo p/ completar a comp. intermediária (dias) t_2 :		365	365	365	365

*Valores ajustados conforme comportamento da curva

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 41 apresenta os gráficos para o aterro da Muribeca conforme aplicação do modelo de Bjarngard e Edgers.

Figura 41 – Gráfico dos recalques estimados das placas 6, 7, 10 e 11 do aterro da Muribeca para o modelo de de Bjarngard e Edgers.



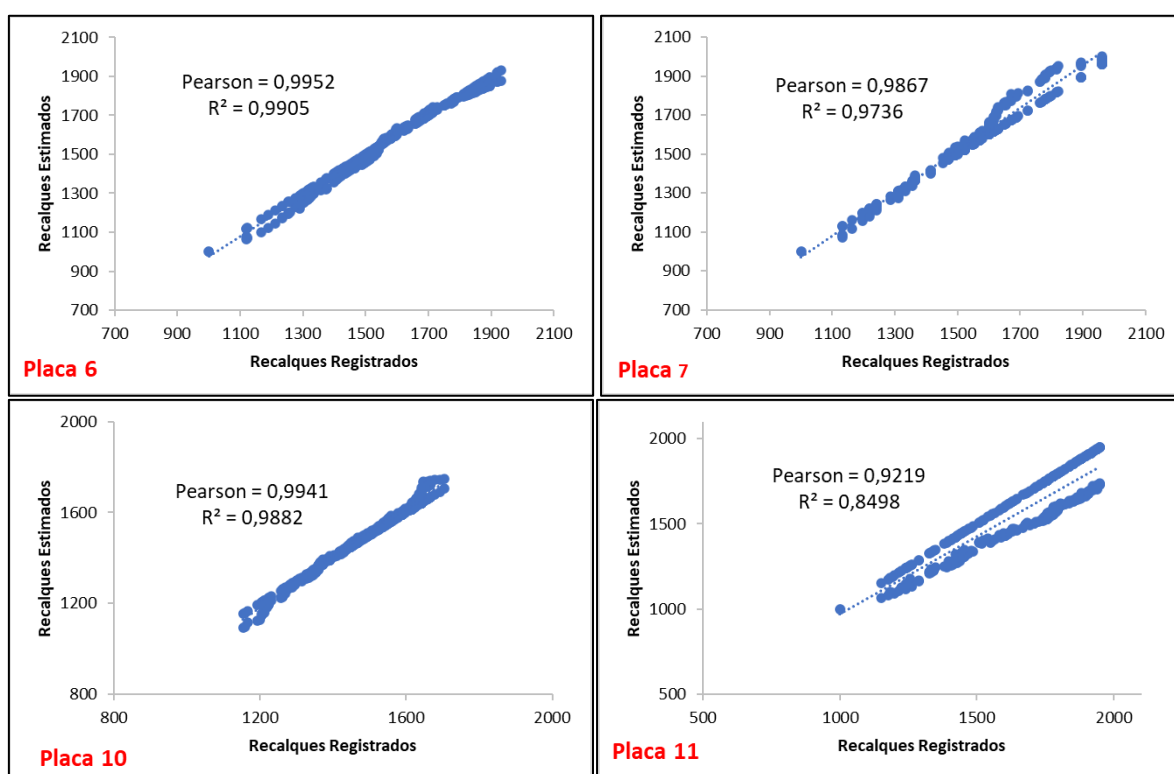
Fonte: Elaboração própria.

Para as placas 6, 7, 10 e 11, os recalques estimados até o ano 2020 foram 5500 mm, 6900 mm, 4000 mm e 3600 mm respectivamente.

Os valores do coeficiente $C\alpha_2$ para as placas 6, 7, 10 e 11 foram 0,21, 0,27, 0,14 e 0,12, respectivamente. Segundo os autores do modelo, o $C\alpha_2$ varia entre 0,017 e 0,51, assim os valores encontrados através da equação da reta e os valores que precisaram ser estimados estão dentro da faixa indicada.

A fim de verificar a aproximação entre os recalques monitorados e os recalques estimados, foram aplicados os ajustes de correlação linear, método de Pearson e Método dos Mínimos Quadrados. Os resultados podem ser observados na Figura 42 e Tabela 9.

Figura 42 – Ajuste de Correlação Linear pelo método dos Mínimos Quadrados, Rec. Registrados vs. Rec. Estimados para as Placas 6, 7, 10 e 11, Célula 4 do aterro da Muribeca.



Fonte: Elaboração própria.

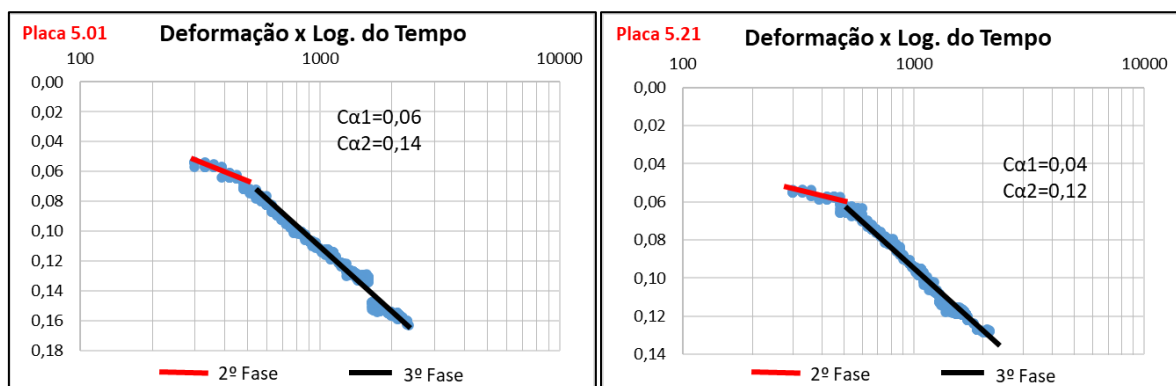
Pelo observado na Figura 42, os resultados apresentados para as placas 6, 7, 10 e 11, da Célula 4 do aterro da Muribeca, mostram que as correlações feitas entre os recalques monitorados e os recalques estimados pelo modelo, variaram entre 0,84

e 0,99. As placas 6, 7 e 10 obtiveram uma correlação mais refinada (entre 0,97 e 0,99) que a placa 11 (entre 0,84 e 0,92).

4.3.2.2 Aterro de Belo Horizonte

Inicialmente conforme orientações do método em análise, foram representados graficamente as deformações medidas em função do logaritmo de tempo, isso com o propósito de determinar os parâmetros de deformação $C\alpha_1$ e $C\alpha_2$, para a segunda e para a terceira fase de deformação, respectivamente. Neste aterro foi possível a análise de ambas as fases para a estimativa dos parâmetros de deformação, tal representação gráfica é apresentada na Figura 43.

Figura 43 – Gráfico de Deformação Registrada vs Log. do Tempo para as placas 5.01 e 5.21 do aterro de Belo Horizonte.



Fonte: Elaboração própria.

Feita a análise para cada fase de deformação e para cada uma das placas, foi possível a estimativa dos valores para os parâmetros $C\alpha_1$ (0,06 e 0,04), $C\alpha_2$ (0,14 e 0,12) e t_2 (450 e 480), os quais são apresentados na Tabela 09. O tempo t_2 , foi estimado a partir do comportamento do gráfico das deformações registradas (Figura 43), observando onde inicia a 3ª fase de deformações. O tempo t_1 foi estimado conforme ajustava-se o comportamento dos recalques estimados, comparados ao comportamento dos recalques monitorados nas placas. Os recalques estimados sob aplicação do modelo para ambas as placas com seus respectivos parâmetros, são apresentadas na Figura 44.

O valor do coeficiente de compressão primária utilizado foi o mesmo do aterro da Muribeca, devido o teor de orgânicos entre os dois aterros ser muito próximo (60% Muribeca e 65% BH). Para o cálculo do recalque primário foram utilizadas a tensão

vertical efetiva no meio da camada e a tensão devido ao acréscimo de carga utilizando a primeira parcela da equação 1, conforme o item 2.2.5.1.

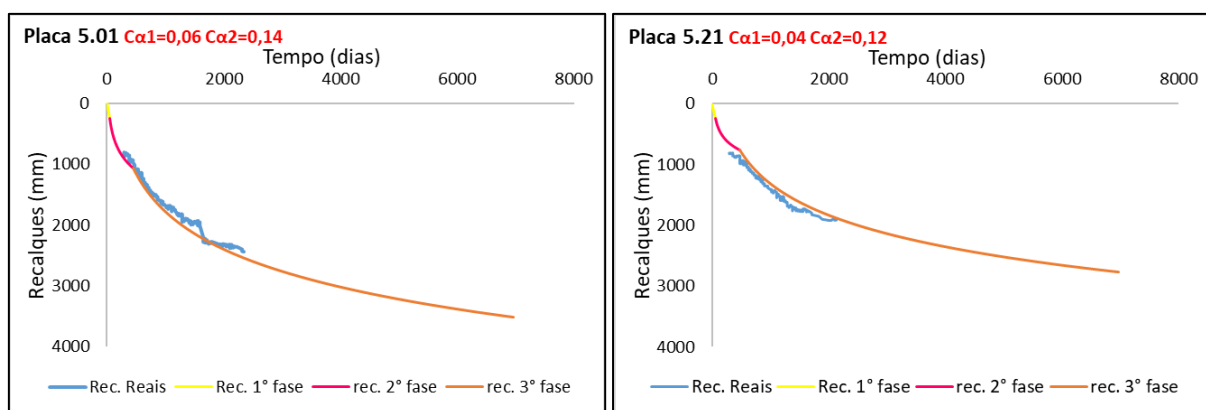
Com o intuito de verificar a aproximação entre os recalques monitorados e os recalques estimados, foram aplicados os ajustes de correlação linear, método de Pearson e Método dos Mínimos Quadrados para as placas 5.01 e 5.21, apresentados na Figura 45.

Tabela 09 – Base de dados do aterro de Belo Horizonte, para aplicação do modelo Bjarngard e Edgers (1990) para as placas 5,01 e 5,21, célula AC-05.

BASE DE DADOS			
	Placa	5,01	5,21
Altura do aterro (mm) (Silva,2010)	H:	15000	
Coeficiente de compressão primária	C' _c :	0,4	
Coeficiente de compressão secundária intermediária	C _{α1} :	0,06	0,04
Coeficiente de compressão secundária de longo prazo	C _{α2} :	0,14	0,12
Tempo para a conclusão da compressão inicial (dias)	t ₁ :	50	
Tempo para a conclusão da compressão intermediária (dias)	t ₂ :	450	480
Tensão vertical efetiva no meio da camada (kN/m ²)	σ _v :	75	
Acrescimento de tensão (kN/m ²)	σ _v :	7,2	
γ cobertura (kN/m ²)		18	
h cobertura (m)		0,4	
Recalque Primário (mm)		238,86	

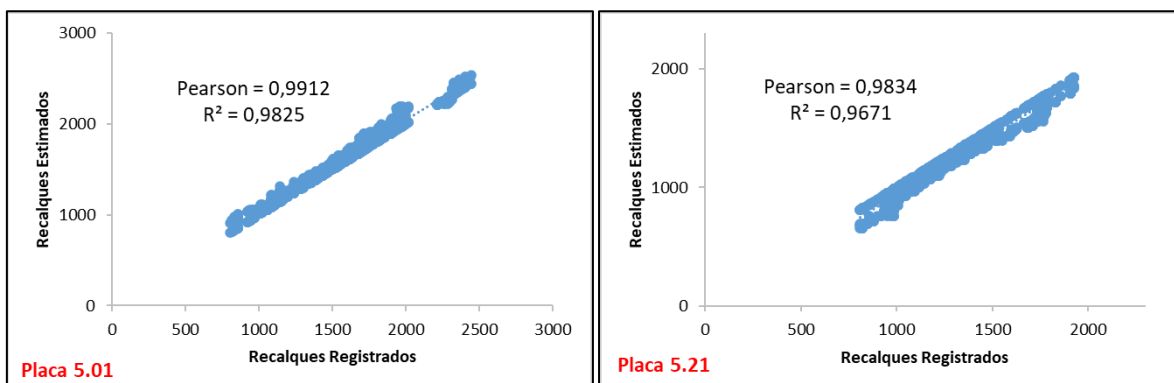
Fonte: Elaboração própria.

Figura 44 – Gráfico dos recalques estimados para o modelo de Bjarngard e Edgers (1990) para as placas 5.01 e 5,21, célula AC-05 do aterro de Belo Horizonte.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 45 – Ajuste de Correlação Linear pelo método dos Mínimos Quadrados, Rec. Registrados vs. Rec. Estimados para as Placas 5.01 e 5.21, aterro de Belo Horizonte.



Fonte: Elaboração própria.

Os gráficos da Figura 44 apresentam os recalques simulados pelo modelo de Bjarngard e Edgers para as placas 5.01 ($C\alpha_1=0,06$, $C\alpha_2=0,14$ e $t_2=450$ dias) e 5.21 ($C\alpha_1=0,04$, $C\alpha_2=0,12$ e $t_2=480$ dias) com comportamento das curvas dos recalques estimados de maneira adequada quando comparados ao comportamento das curvas referentes aos recalques monitorados.

Os valores de correlação linear encontrados para a placa 5.01 para o método de Pearson foi de 0,9912 enquanto pelo Método dos Mínimos Quadrados foi 0,9825. Já para a placa 5.21 os valores obtidos foram 0,9834 e 0,9671, respectivamente.

Devido os valores dos parâmetros e de tempo se divergirem para as duas placas, a fim de aplicarmos para as demais camadas, foi feita uma média entre estes valores de $C\alpha_1$, $C\alpha_2$ e t_2 . A partir disso serem aplicados para as demais camadas subsequentes. Os valores encontrados através da média foram, para $C\alpha_1= 0,05$, para $C\alpha_2= 0,13$, e para $t_2= 465$ dias, quanto os demais parâmetros e dados, foram mantidos conforme foram apresentados na Tabela 09.

Devido à disposição dos resíduos se dar por camadas, é importante considerar que tenham ocorrido acréscimos de recalques conforme foram dispostos os resíduos em cada camada. Em razão disso, foi realizada a simulação dos recalques provocados pela superposição de camadas suprajacentes. Para a determinação dos acréscimos de carga utilizou-se a equação 9 que consta no item 4.2.2, na sequência calcularam-se os recalques primários representados pela 1ª fase de deformação do modelo Bjarngard e Edgers (primeira parcela da Equação 1). Tais resultados podem ser observados na Tabela 7 do item 4.2.2, pois ambos os modelos, Tapahuasco e Bjarngard e Edgers, utilizam a mesma equação para a parcela da primeira fase de

deformações, o que envolve os mesmos dados de entrada. Foi analisada camada por camada conforme modelo apresentado na Figura 38. Os parâmetros como peso específico da camada deformada, peso específico do carregamento e coeficiente de compressão primária, foram 14kN/m^3 , 10kN/m^3 e $0,3$, respectivamente.

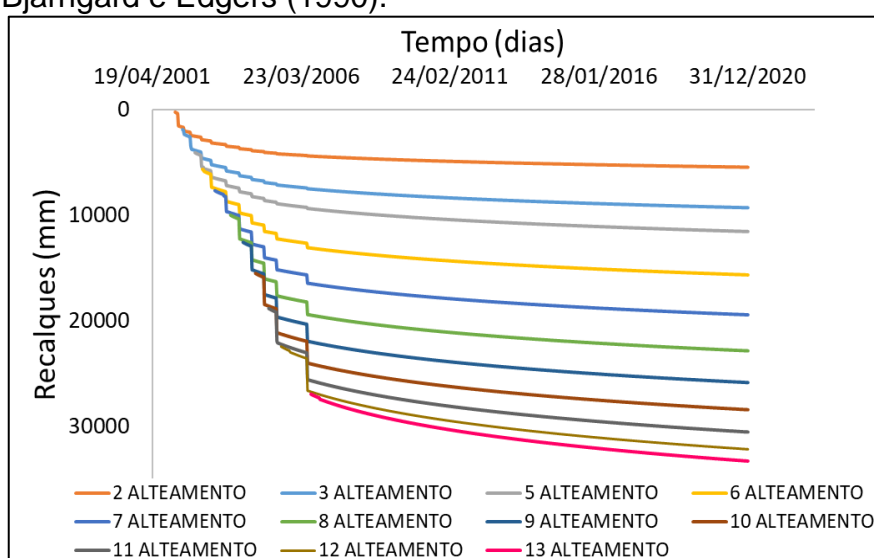
A Tabela 10 apresenta a base de dados necessária na a aplicação do método para as camadas que compõem a célula AC-05 do aterro de Belo Horizonte, enquanto a Figura 46 mostra o comportamento dos recalques estimados para as camadas da célula, acrescidos das sobrecargas dos alteamentos suprajacentes.

Tabela 10 – Base de dados do aterro de Belo Horizonte, para aplicação do modelo Bjarngard e Edgers (1990) para cada espessura de camada da célula AC-05.

BASE DE DADOS				
Altura do aterro (mm) (Silva,2010)	H:	15000	10000	5000
Coeficiente de compressão primária	C'c:	0,4	0,4	0,4
Coeficiente de compressão secundária intermediária	α_1 :	0,05	0,05	0,05
Coeficiente de compressão secundária de longo prazo	α_2 :	0,13	0,13	0,13
Tempo para a conclusão da compressão inicial (dias)	t1:	50	50	50
Tempo para a conclusão da compressão intermediária (dias)	t2:	465	465	465
γ cobertura (kN/m^2)		18	18	18
h cobertura (m)		0,4	0,4	0,4

Fonte: Elaboração própria.

Figura 46 – Gráfico dos recalques estimados do aterro de Belo Horizonte para o modelo de Bjarngard e Edgers (1990).



Fonte: Elaboração própria.

As espessuras das camadas foram variando conforme a aplicação de novos alteamentos, assim as tensões também variaram conforme as espessuras. Os parâmetros $C\alpha_1=0,05$, $C\alpha_2=0,13$ e $t_2=465$ dias, foram fixados a partir da média das placas 5.01 e 5.21.

A Figura 46 apresenta a estimativa dos recalques para o aterro de Belo Horizonte, recalques estimados pelo modelo de Bjarngard e Edgers, sob o efeito dos acréscimos de carga causados pela aplicação de uma nova camada, com isso, o recalque estimado até 2020 foi de 33300 mm.

4.3.2 Aplicação modelo de Meruelo (1995)

4.3.2.1 Aterro da Muribeca

Para a aplicação do presente modelo no aterro da Muribeca, foi necessário a obtenção do parâmetro coeficiente de perda de massa transformada em recalques (α), sendo para isso, utilizada a equação 4 do item 2.2.5.2. Para o parâmetro COD, segundo Melo (2003) o valor é 0,30 (fração orgânica biodegradável), devido a porcentagem total de matéria orgânica para o aterro da Muribeca ser de 60%, O tempo de construção do aterro (t_c), foi obtido com as datas de início de disposição dos resíduos e final de construção do topo da célula 4. A idade do aterro no início do nivelamento (t_0), foi obtido através das datas de início de disposição dos resíduos e instalação das placas. O coeficiente de hidrólise (kh) para as placas aplicadas ao aterro da Muribeca foram obtidos de maneira iterativa, conforme melhor se comportavam os recalques estimados comparados ao comportamento dos recalques monitorados, o coeficiente de perda de massa α , foi obtido através da Equação 4. A Equação 3, utilizada para a estimativa dos recalques para este modelo, nos permite a estimativa dos recalques a partir do zero, pois leva em consideração apenas a espessura final de construção da célula, enquanto a equação 2 considera que a espessura do aterro é a existente no momento em que se iniciam os monitoramentos. Para este aterro utilizamos da Equação 3.

Na Figura 47 apresentam-se os gráficos com as deformações estimadas para o aterro da Muribeca através da aplicação do modelo de Meruelo (1995), a base de

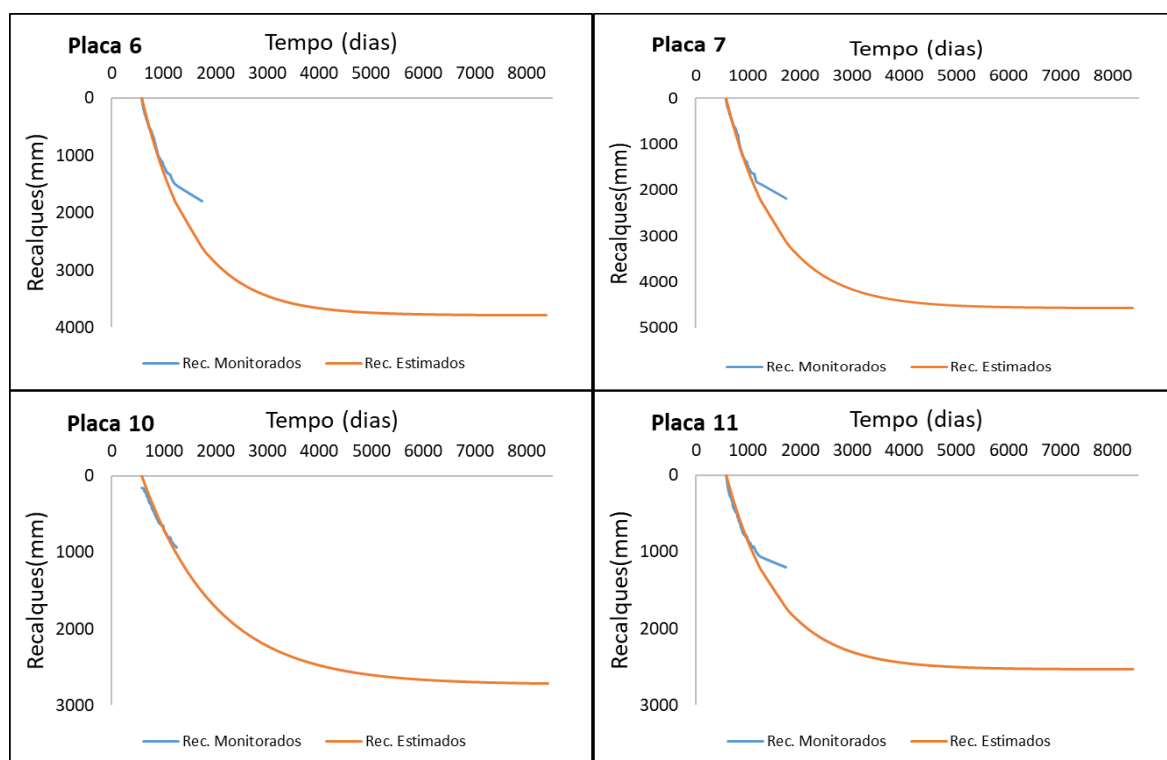
dados de cada placa está descrita na tabela 11. Na sequência na Figura 48 são apresentadas as correlações pelo método de Pearson e Mínimos Quadrados.

Tabela 11 – Base de dados das placas 6, 7, 10 e 11, Célula 4 do aterro de Muribeca, para aplicação do modelo Meruelo (1995).

BASE DE DADOS					
	Placa	6	7	10	11
Altura do aterro (mm) (Melo,2003)	H:	15000	15000	15000	15000
Qtd. mat. org. biod. presente nos resíduos por ano (Melo,2003)	COD:	0,3	0,3	0,3	0,3
Coeficiente de perda de massa	α :	1,24	1,50	0,80	0,83
Coeficiente de hidrólise (1/dia)	kh:	0,001	0,001	0,001	0,001
Tempo de construção do aterro (dias) (Melo,2003)	tc:	365	365	365	365
Idade do aterro no início do nivelamento (dias) (Melo,2003)	t0:	577	577	577	577
Idade do aterro no último nivelamento	t1:	-	-	-	-

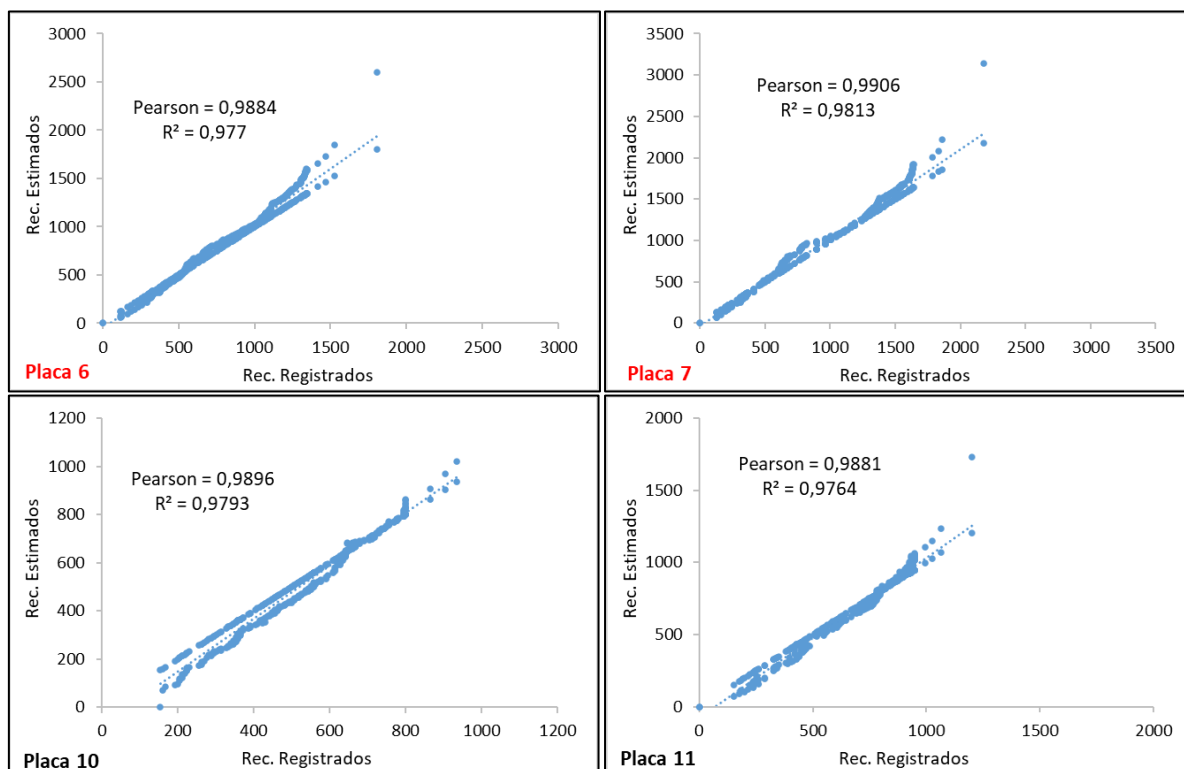
Fonte: Elaboração própria.

Figura 47 – Gráfico dos recalques estimados da placa 6, 7, 10 e 11, Célula 4 do aterro da Muribeca para o modelo de Meruelo.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 48 – Ajuste de Correlação Linear pelo método dos Mínimos Quadrados, Rec. Registrados vs. Rec. Estimados para as placas 6, 7, 10 e 11, Célula 4 do aterro da Muribeca.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 47 nos apresenta os recalques estimados através do método Meruelo e os recalques monitorados na célula 4, cada placa obteve seu próprio coeficiente α , que leva em consideração os recalques ocorridos (monitorados) na placa em análise. As placas 6 e 7 apresentam valores de α mais próximos entre si 1,24 e 1,5, enquanto as placas 10 e 11 apresentam valores diferentes das placas 6 e 7, mas também próximos entre si, 0,80 e 0,83. As placas 10 e 11 estão localizadas mais afastadas das placas 6 e 7, as quais se encontram mais ao centro da célula 4, como apresentado na Figura 14. Isso pode explicar tais variações nos valores encontrados para o parâmetro α . O parâmetro kh , foi obtido de forma iterativa, via tentativa e erro, com o objetivo de um melhor ajuste entre os recalques estimados e os recalques monitorados. Os recalques estimados até o ano de 2020, para as placas 6, 7, 10 e 11 correspondem a 3782mm, 4559mm, 2710mm e 2527mm respectivamente.

A análise de correlação apresentada na Figura 48, nos demonstra que pelos dos métodos de correlação, Pearson e Mínimos Quadrados existe uma boa correlação

entre os recalques estimados pelo método e os recalques monitorados na Célula 4, esses valores de correlação variaram entre 0,97 e 0,99.

4.3.2.2 Aterro de Belo Horizonte

Para a aplicação do modelo de Meruelo foram obtidos os parâmetros necessários para a Equação 2, a qual considera que a espessura do aterro é a existente no momento em que se iniciam os monitoramentos. O parâmetro COD, que leva em consideração o teor de orgânicos fixado em 0,24, tempo de construção (t_c) em 334 dias e a idade do aterro no início do nivelamento (t_0) 638 dias, conforme as datas de monitoramento no aterro de Belo Horizonte. A aplicação se deu inicialmente, para o primeiro alteamento (1/2), o qual possui uma espessura de 15m.

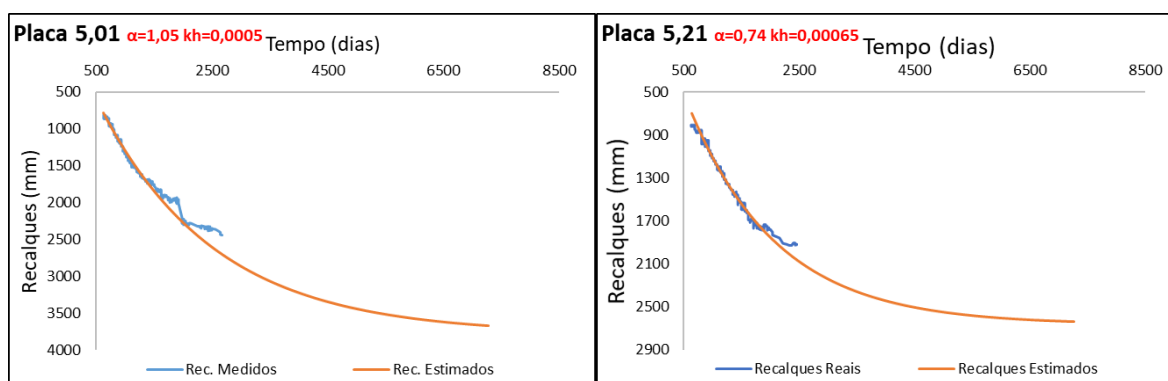
Na Tabela 12 apresentam-se os dados necessários para aplicação do modelo de Meruelo (1995), para cada uma das placas, 5,01 e 5,21 e, posteriormente, a Figura 49 os gráficos dos recalques estimados através do modelo.

Tabela 12 – Base de dados do aterro de Belo Horizonte, para aplicação do modelo Meruelo (1995) para as placas 5,01 e 5,21, célula AC-05 do aterro de Belo Horizonte.

BASE DE DADOS			
	Placa	5,1	5,21
Altura do aterro (mm) (Silva,2010)	H:	15000	
Quantidade de matéria orgânica biodegrável presente nos resíduos por ano	COD:	0,2397	
Coeficiente de perda de massa	α :	1,05	0,74
Coeficiente de hidrólise (1/dia)	kh:	0,0005	0,00065
Tempo de construção do aterro (dias) (Silva,2010)	t_c :	334	
Idade do aterro no início do nivelamento (dias) (Silva,2010)	t_0 :	638	

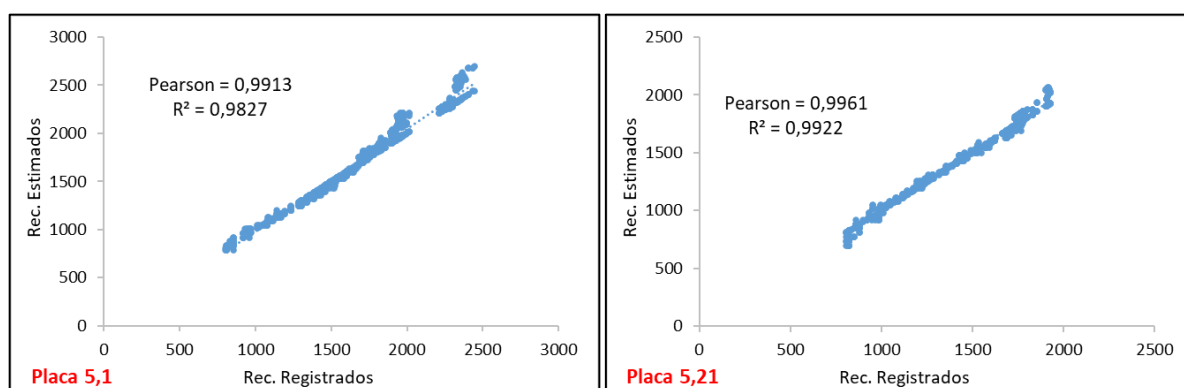
Fonte: Elaboração própria.

Figura 49 – Gráfico dos recalques estimados para o modelo de Meurelo (1995) para a placa 5.01 e 5.21, célula AC-05 do aterro de Belo Horizonte.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 50 – Ajuste de Correlação Linear pelo método dos Mínimos Quadrados, Rec. Registrados vs. Rec. Estimados para as placas 5,1 e 5,21 do aterro de Belo Horizonte.



Fonte: Elaboração própria.

A figura 49 nos apresenta os recalques estimados através do método e os recalques monitorados na célula AC-05, cada placa obteve seu próprio coeficiente α , que leva em consideração os recalques ocorridos (monitorados) na placa em análise, onde para a placa 5,01 $\alpha=1,05$ e para a placa 5,21 $\alpha=0,74$. O coeficiente kh foi 0,0005 e 0,00065 para as placas 5.01 e 5.21, respectivamente. O parâmetro α foi obtido através da Equação 4, enquanto o coeficiente kh foi ajustado conforme o comportamento dos recalques estimados nos gráficos. Para o ano de 2020 foram estimados que os recalques para a placa 5.01 de 3700 mm aproximadamente e para a placa 5.21 2600 mm aproximadamente.

Na Figura 50 tem-se as correlações, onde para a placa 5.01 os valores ficaram acima de 0,98 e para a placa 5.21 acima de 0,99, indicando uma boa aproximação dos valores estimados com os monitorados.

A partir da análise das placas 5,01 e 5,21 determinou-se a média dos valores encontrados para cada um dos parâmetros α e k_h , para assim, poder aplicar nos demais alteamentos, os quais são 0,90 e 0,0006 respectivamente. Neste caso não foi possível considerar o efeito dos acréscimos de carga nas camadas inferiores, pois o método em estudo não possibilita essa análise.

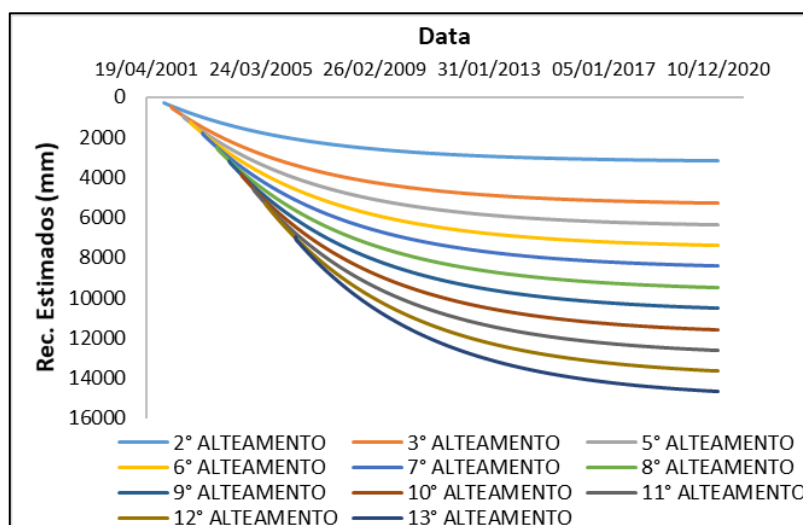
Os parâmetros de tempo de construção do aterro (t_c), idade do início do nivelamento (t_0) e espessura de cada alteamento, diferem para cada alteamento, enquanto que os demais parâmetros (COD, α , K_h , H) seguem constantes. A base de dados é apresentada na Tabela 13 e o gráfico resultado da aplicação do modelo na Figura 51.

Tabela 13 – Base de dados do aterro de Belo Horizonte, para aplicação do modelo Meruelo (1995) para a célula AC-05.

BASE DE DADOS											
Altura do aterro (mm) (Silva,2010)										H:	15000
Quantidade de matéria orgânica biodegradável presente nos resíduos										COD:	0,24
Coeficiente de perda de massa										α :	0,90
Coeficiente de hidrólise (1/dia)										k_h :	0,0006
Alteamento	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Espessura (m)	15	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
t_c (dias)	334	90	153	92	151	183	152	153	153	151	365
Alteamento	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Espessura (m)	15	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
t_0 (dias)	638	243	1096	792	242	488	397	671	153	577	426

Fonte: Elaboração própria.

Figura 51 – Gráfico dos recalques estimados da célula AC-05, do aterro de Belo Horizonte para o modelo de Meruelo (1995).



Fonte: Elaboração própria.

O gráfico da Figura 51 apresenta a estimativa dos recalques para o aterro de Belo Horizonte. Os recalques estimados pelo modelo de Meruelo até 2020 foi de aproximadamente 14700 mm.

5 ANÁLISE E CORRELAÇÃO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DE RECALQUES

Tabela 14 – Tabela de correlação da aplicação de modelos de previsão de recalques

	TAPAHUASCO				BJARNGARD				MERUELO							
	PLACA	6	7	10	11	PLACA	6	7	10	11	PLACA	6	7	10	11	
MURIBECA	TK	200	200	200	200	Ca2	0,21	0,27	0,14	0,12	α	1,24	1,5	0,79	0,83	
	K	0,0006	0,0006	0,0003	0,0006	t2	365	365	365	365	kh	0,001	0,001	0,001	0,001	
	Cs	0,045	0,045	0,045	0,045											
	Pearson	0,9864	0,9775	0,9972	0,8579	Pearson	0,9952	0,9867	0,9941	0,9219	Pearson	0,9884	0,9906	0,9896	0,9881	
	R²	0,9731	0,9555	0,9944	0,736	R²	0,9905	0,9736	0,9882	0,8498	R²	0,977	0,9813	0,9793	0,9764	
	Rec. 2020 (mm)	5046	5046	4794	5046	Rec. 2020 (mm)	5570	6930	4048,41	3613	Rec. 2020 (mm)	3782	4564	2710	2527	
BELO HORIZONTE	PLACA	5,01	5,21	TODAS		PLACA	5,01	5,21	TODAS		PLACA	5,01	5,21	TODAS		
	TK	160	160	160		Ca1	0,06	0,04	0,05		α	1,05	0,74	0,9		
	K	0,0002	0,0001	0,00015		Ca2	0,14	0,12	0,13		kh	0,0005	0,00065	0,0006		
	Cs	0,048	0,048	0,048		t2	450	480	465							
	Pearson	0,995	0,9896	-		Pearson	0,9912	0,9834	-		Pearson	0,9913	0,9961	-		
	R²	0,9899	0,9793	-		R²	0,9825	0,9671	-		R²	0,9827	0,9922	-		
	Rec. 2020 sem acresc.(mm)			11000		-	-	-	-		Rec. 2020 sem acresc.(mm)			14668,0938		
	Rec. 2020 com acresc.(mm)			27000		Rec. 2020 com acresc.(mm)			33300		-	-	-	-		

Fonte: Elaboração própria.

Comparando os resultados de correlação linear entre recalques estimados e monitorados, apresentados na Tabela 14, pode-se dizer que para os três modelos estudados os ajustes mostraram-se satisfatórios. Dessa forma, no aterro da Muribeca os valores médios de R^2 e de Correlação Pearson correspondem a, 0,91 e 0,95 para o modelo acoplado proposto por Tapahuasco (2009), 0,95 e 0,97 para o Modelo de Bjarngard e Edgers (1990) e, 0,98 e 0,99 para o Modelo Meruelo (1995). Já para o aterro Belo Horizonte, os valores médios de R^2 e de Correlação Pearson, são 0,98 e 0,99 para o modelo acoplado proposto por Tapahuasco, 0,97 e 0,99 sob aplicação do Modelo de Bjarngard e Edgers e, 0,99 e 0,99 para o Modelo Meruelo. Conseqüentemente, de maneira geral, o modelo Meruelo mostrou um ajuste de correlação linear mais próximo de 1.

Os recalques estimados até o ano de 2020 para a Célula 4 do aterro da Muribeca, mostram valores próximos entre o modelo Tapahuasco e modelo de Bjarngard e Edgers, apresentando respectivamente média de magnitude aproximada de 4900 mm e 5000 mm, enquanto que para o modelo Meruelo a média foi de 3400mm. Para a célula AC-05 do aterro de Belo Horizonte, as estimativas de recalques acumulados foram estudadas com e sem acréscimos de carga, onde para o modelo de Tapahuasco sem os acréscimos de carga, a magnitude foi de 11000 mm, já para o modelo de Meruelo a magnitude foi de aproximadamente 14700mm. As magnitudes dos recalques considerando os efeitos dos acréscimos de carga foram, para o modelo de Tapahuasco igual a 27000mm e para o modelo de Bjarngard e Edgers de 33300mm. O modelo de Tapahuasco obteve na maioria das médias de estimativa de recalques, valores menores que os demais modelos, somente para o aterro da Muribeca observou-se que o modelo Meruelo obteve uma estimativa de recalques pouco menor se comparados com os outros modelos. O modelo que obteve maiores recalques foi de Bjarngard e Edgers, valores de grandeza bem maiores para o aterro de Belo Horizonte do que o modelo de Tapahuasco.

O coeficiente de compressão secundária mecânica (C_s) no modelo de Tapahuasco pode ser estimado a partir da porcentagem de matéria orgânica existente na célula em estudo, independente se são conhecidos os recalques monitorados. No entanto, no modelo de Bjarngard e Edgers para determinar o parâmetro de compressão secundária mecânica ($C_{\alpha 1}$), necessita dos recalques monitorados, tornando-se difícil a estimativa dos recalques em aterros, caso não se possua esse histórico. O coeficiente C_s do modelo de Tapahuasco para os aterros Muribeca e Belo

Horizonte foram 0,045 e 0,048, respectivamente. Enquanto que o coeficiente $C\alpha_1$ do modelo de Bjarngard e Edgers foi 0,05 para o aterro de Belo Horizonte. Já para o aterro da Muribeca devido à falta de dados dos recalques monitorados, não foi possível estimar o $C\alpha_1$.

No modelo de Tapahuasco o parâmetro k controla as deformações devido à biodegradação. No modelo de Meruelo o parâmetro k_h é usado para estimar a velocidade de degradação da matéria orgânica. O parâmetro k do modelo de Tapahuasco foi em média de 0,0004 para o aterro da Muribeca, no aterro de Belo Horizonte o parâmetro k foi de 0,00015. Já no modelo de Meruelo o valor de k_h foi de 0,001 para o aterro da Muribeca e, 0,0006 para o aterro de Belo Horizonte.

O tempo do início da bioconversão (t_k e t_2) é período em que se iniciam os recalques sob os efeitos da bioconversão da massa orgânica em gás natural. Devido à falta de dados dos registros dos recalques iniciais nas células estudadas, o tempo da bioconversão foi estimado utilizando retroanálise para os modelos Tapahuasco e Bjarngard e Edgers. Estimou-se para o modelo de Tapahuasco um tempo de 200 dias para o aterro da Muribeca e para o aterro de Belo Horizonte 160 dias em média. A aplicação do modelo de Bjarngard e Edgers estimou um t_2 para o aterro de Belo Horizonte em média 465 dias, já para o aterro da Muribeca, devido à falta dos registros dos recalques iniciais, o t_2 foi limitado ao início do monitoramento da célula, correspondendo ao tempo de 365 dias.

Se comparados os modelos Bjarngard e Edgers e modelo Meruelo com o modelo proposto por Tapahuasco, este último possibilita a estimativa dos recalques, mesmo não possuindo o histórico dos registros iniciais. Dessa forma, o modelo de Tapahuasco possibilitou a estimativa dos recalques da 1ª fase (primários) e da 2ª fase (secundários mecânicos), a partir do conhecimento do teor orgânico inicial dos RSU e espessuras iniciais das células dos aterros. Possibilitando assim, realizar a retroanálise dos recalques já ocorridos. O modelo de Tapahuasco possibilitou também a simulação dos recalques sob acréscimos de carga, levando em consideração o efeito da biodegradação. Conforme Tapahuasco (2009), as deformações mecânicas pertencentes à segunda fase de deformações continuam a se desenvolver mesmo após o início da bioconversão (t_k). Iniciada a terceira fase de deformações (fase de bioconversão), o coeficiente de compressão C_s deixa de ser um parâmetro e torna-se um índice que varia em função da variação do teor de orgânicos, isso devido a

biodegradação. Para a segunda fase de deformações no aterro de Belo Horizonte o coeficiente $C's$ foi de 0,048, já na terceira fase de deformações, o coeficiente encontrava-se no valor de 0,023, correspondendo ao ano de 2020.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a aplicação dos modelos de previsão de recalques nos aterros da Muribeca e de Belo Horizonte, foi necessário fazer um ajuste dos recalques monitorados. Esse ajuste foi realizado devido ao fato de os monitoramentos dos recalques terem iniciado tempo depois do encerramento das células. Em virtude disso, foram acrescentados recalques iniciais estimados que pudessem ter ocorrido entre o período do encerramento das células e o início dos monitoramentos.

A aplicação dos métodos de Pearson e de Mínimos Quadrados no ajuste linear da retro análise dos recalques registrados vs. estimados, mostraram que os modelos, Tapahuasco, Bjarngard e Edgers e, Meruelo, obtiveram ajustes satisfatórios, destacando, especialmente o modelo de Meruelo por apresentar ajustes mais próximos de 1. No entanto, essa retro análise não seria o suficiente para atestar qual é o modelo que apresenta mais acurácia na estimativa dos recalques ao longo do tempo, sendo para isso, realizar a comparação entre o recalque acumulado ocorrido até a presente data, juntamente com o recalque estimado. Essa comparação não foi possível de ser feita, devido a não ter acesso aos dados atualizados dos aterros.

Os recalques estimados pelos modelos no aterro da Muribeca foram em média 4900 mm, 5000 mm e 3300 mm para os modelos de Tapahuasco, Bjarngard e Edgers e Meruelo, respectivamente. No aterro de Belo Horizonte os recalques sem acréscimo de carga foram, 11000 mm e 14600 mm para os modelos de Tapahuasco e Meruelo, respectivamente. Enquanto, sob acréscimos de carga, foram 27000 mm e 33300 mm para os modelos de Tapahuasco e Bjarngard e Edgers, respectivamente. Para os aterros estudados, o modelo de Bjarngard e Edgers é o que apresentou maiores magnitudes de recalques, enquanto que o modelo de Meruelo estimou as menores magnitudes. Apenas para o aterro de Belo Horizonte, na condição sem acréscimo de carga, o modelo de Meruelo apresentou recalques maiores que o modelo de Tapahuasco.

A aplicação do modelo Tapahuasco para os aterros estudados, conforme os resultados obtidos possibilitou a estimativa dos recalques já ocorridos sem a necessidade dos mesmos terem sido monitorados. Além disso, o modelo permitiu a simulação dos recalques nas camadas de RSU sob acréscimos de cargas, envolvendo a disposição de novos alteamentos e, considerando o efeito da biodegradação.

Esta pesquisa permitiu validar modelo acoplado proposto por Tapahuasco (2009), sendo aplicado para os aterros sanitários da Muribeca e do Belo Horizonte e, obtendo-se ajustes de correlação linear aceitáveis. Além disso, os valores estimados da constante de degradação cinética mantiveram-se dentro da faixa de valores encontrados pelo autor. Já o desenvolvimento dos recalques devido ao efeito da biodegradação nos aterros sanitários, mostraram tempos de início da bioconversão maiores aos obtidos pelo autor.

Finalmente, destaca-se a importância de instrumentar e monitorar as células de aterros sanitários, isso com o intuito de poder propor e melhorar métodos analíticos e numéricos, que permitam simular os comportamentos mecânicos que ocorrem nos maciços de RSU. Através disso, aumentar a vida útil das células de aterros sanitários, bem como estimar um período em que venham a cessar suas deformações devido à biodegradação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 10004: Resíduos Sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (2018). **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, (2018).

BAREITHER, C.A., BREITMEYER, R.J., ERSES, A.S., BENSON, C.H., EDIL, T.B., BARLAZ, M.A., 2008. **Relative contributions of moisture and biological activity on compression of municipal solid waste in bioreactor landfills**. In: Proc. Glob. Waste Symp. 2008, Copper Mountain, Colorado, USA.

BJARNGARD, A.; EDGERS, L. (1990). **Settlement of municipal solid waste landfills**. *Proc.*, 13th Annual Madison Waste Conference, University of Wisconsin, Madison, p.192-205.

BOSCOV, G. E. M. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

CARVALHO, M. F.; Vilar, O.M. ; Kaimoto, L. S. (2000). **Estudo da compressibilidade de resíduos sólidos urbanos**. Solos e Rochas, São Paulo, v.23, n.1, p. 3-19.

CARTIER, G. & BALDIT, R. **Comportement Géotechnique des Décharges de Résidus Urbains**. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris – França, n. 128, p.55-64, 1983.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G.F. **Procedimentos operacionais de aterros sanitários: análise de 6 anos de monitoramento do aterro sanitário de Belo Horizonte**. MG In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 6, 2007, Recife, PE. Anais... São Paulo: ABMS, 2007.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação**. Tese (Doutorado em Sanemamento) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

COPOLA, G. A **Política Nacional de Resíduos Sólidos: Lei federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010: os aterros sanitários de rejeitos e os municípios**. Fórum de Direito Urbano e Ambiental, Belo Horizonte, v. 10, n. 58, 2011.

DAS M. Braja. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução All Tasks. 6. Ed. São Paulo, 2007.

DIAZ, J. G. L. NAREA, M. S.; SANCHEZ-ALCITURRI, J. M.; IBARRA, A. A., MONZON, I.T.; GONZALEZ, J. P.; LAMIA, M.F. **Estimating material losses in sanitary landfills through biological degradation**. In: Proc. 5th International Landfill Symposium – Sardinia 95, Cagliari, Italy, p. 203-208, 1995.

DIXON, N., JONES, D.R.V., 2005. **Engineering properties of municipal solid waste**. Geotext. Geomembr. 23, 205–233.

D'ALMEIDA, M.L.O.; VILHENA, A. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. 2.ed. São Paulo: IPT/CEMPRE,2000.

FILHO F. B. DALSON; JÚNIOR S. A. JOSÉ. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)***. Revista Política Hoje, Vol. 18, n. 1, 2009.

EDIL, T. B.; RANGUETTE, V.J.; WUELLNER, W.W. **Settlement of municipal refuse**. In: LANDVA, A.; KNOWLES, D., eds., Geotechnics of waste fills – Theory and Practice, ASTM STP 1070, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.225-239, 1990.

EL-FADEL, M., KHOURY, R. **Modeling settlement in MSW landfills: a critical review**. Critical Reviews in Environmental Science and technology, 30(3), pp 327-361, 2000.

ELK, V. P. H. G. A. **Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos**: Redução de emissões na disposição final. Rio de Janeiro: IBAM, 2007.

FEAM, **Fundação Estadual do Meio Ambiente**: orientações básicas para operação de aterro sanitário. Belo Horizonte: FEAM 2006.36p.

FERRARI, A. A. P. **Viabilidade da utilização de silte compactado como material de impermeabilização em aterros de resíduos**. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

GERALDO S.M. **Destino final dos resíduos**. Sistemas de Tratamento de Água e Resíduos, 2019 Disponível em: < <https://slideplayer.com.br/slide/12933890/> >. Acesso em: 05 de abril de 2018.

GIBSON, R. E.; LO, K. Y. **A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression**. Acta Polytechnica Scandinavica, c. 10, n. 296, p. 1-16, 1961.

GRISOLIA, M.; NOPOLEONI, Q. **Geotechnical Characterization of Municipal Solid Waste: Choice of Design Parameter**. Proc. Of The Second International Congresso n Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, v.2, p. 641-646, 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Tabela 110 - Quantidade diária de lixo coletado, por unidade de destino final do lixo coletado, segundo as Grandes Regiões, Unidades da Federação, Regiões**

Metropolitanas e Municípios das Capitais - 2000 Disponível em: < <https://abrelpe.org.br/panorama/> >. Acesso em: 05 de abril de 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. 2. Ed. São Paulo, 2000. IPT Publicação 2.622.

JUCÁ, J.F.T., MONTEIRO, V.E.D., OLIVEIRA, F.J.S, MACIEL, F.J. (1999), **Monitoramento Ambiental do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca**. III Seminário Nacional sobre Resíduos Sólidos Urbanos, Toledo, Paraná, CD, 1999.

Ling, H. I., Leshchinsky, D., Mohri, Y., Kawabata, T. (1998). **Estimation of municipal solid waste landfill settlement**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, January, v 124, Issue 1, pp: 21-28.

MANASSERO, M; VAN IMPE, W.F.; BOUAZZA, A. **Waste disposal and containment**. Proc. , 2nd International Congresso on Environmental Geotechnics. Osaka, Japão, 1996, v.3, p. 1425-1474.

MARIANO, M. O. H., MACIEL, F. J., FUCALE, S. P., JUCÁ, J. F. T., BRITO, A. R. (2007), **Estudo da Composição dos RSU do Projeto Piloto para Recuperação do Biogás no Aterro da Muribeca/PE**. VI Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental, Recife, PE, 2007.

MARIANO, M. O. H. **Recalques no aterro de resíduos sólidos da Muribeca-PE**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil-UFPE: 142 p, 1999.

MARQUES, A. C. M. **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos**. Tese. (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

MCDUGALL, J., 2007. **A hydro-bio-mechanical model for settlement and other behaviour in landfilled waste**. Comput. Geotech. 34, 229–246.

MEHTA, R., BARLAZ, M.A., YAZDANI, R., AUGENSTEIN, D., BRYARS, M., SINDERSON, L., 2002. **Refuse decomposition in the presence and absence of leachate recirculation**. J. Environ. Eng. 128, 228–236.

MELO, M. C. **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muibeca**. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.

MONTGOMERY, C. Douglas; RUNGER, C. George. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Tradução Verônica Calado. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

MONTEIRO, D. E. V. **Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do Aterro da Muribeca**. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.

MUÑOZ, S. I. S. **Impacto ambiental na área do aterro sanitário e incinerador de resíduos sólidos de Ribeirão Preto, SP: Avaliação dos níveis de metais pesados.** Ribeirão Preto, 131p., 2002. Tese (Doutorado em Enfermagem em Saúde Pública) - Programa de Pós-Graduação de Enfermagem em Saúde Pública, Universidade de São Paulo (USP).

OUVRY, J. F., PAGE, B. **Settlement of waste package in chaffs in a domestic waste disposal.** In: International Workshop Hydro – Physico - Mechanics Of Landfills, Grenoble, France, 2005. Proceedings... Grenoble: Grenoble University, 2005.

PALMA, J. H. G. **Comportamiento geotecnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos.** Tesis Doctoral – Universidad de Cantabria, p. 336,1995.

SILVA, N. L. da S. e. **Aterro sanitário para resíduos sólidos urbanos - RSU – matriz para seleção da área de implantação.** 2011. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Departamento de Tecnologia, Universidade Federal de Feira de Santana, Feira de Santana, 2011.

SILVA, R. H. F. **Aplicação de Modelos Numéricos para Estimativa de Recalques de um Célula do Aterro Sanitário de Belo Horizonte.** 2010. Dissertação (Mestrado em Saneamento) – Programa de Pós- Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

SIMÕES, G. F. **Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos.** Tese. (Doutorado em Engenharia Civil: Geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2000.

SIMÕES, G.F.; CATAPRETA, C.A.A.; MARTINS, H.L. e BATISTA, H.B. **Recalques em resíduos sólidos dispostos no aterro sanitário de Belo Horizonte.** In: SIMPÓSIO LUSOBRASILEIRO, XI, 2004. Natal, 2004.

SOWERS, G. F. **Settlement of waste disposal fills.** In: International Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering, 8, 1973. Moscow, RU. Proceedings. Moscow, 1973. Part 2.

TAPAHUASCO, W. F. C. **Análise do comportamento de maciços sanitários e proposta de um novo modelo de previsão de recalques considerando a parcela de biodegradação.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

TEIXEIRA, M. C. **Previsão e monitoramento de recalques em aterros sanitários/estudo de casos: central de resíduos de recreio – Minas do Leão/RS e São Leopoldo/RS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

VAN MEERTEN, J. J., SELLMEIJER, J. B., PEREBOOM, D. (1995). **Prediction of landfill settlements.** Proceeding Sadinia 95, Fith International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October: 823-831.

WALL, D.K. E ZEISS, C. **Municipal landfill biodegradation and settlement.**
Journal of Environmental Engineering, v. 121, n. 3, pp. 214-224, 1995.