

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,**  
**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**APLICAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA**  
**ESTIMATIVA DE RECALQUES DE UMA**  
**CÉLULA DO ATERRO SANITÁRIO DE BELO**  
**HORIZONTE**

**Fábio Henrique Rodrigues da Silva**

**Belo Horizonte**

**2010**

**APLICAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA  
ESTIMATIVA DE RECALQUES DE UMA  
CÉLULA DO ATERRO SANITÁRIO DE BELO  
HORIZONTE**

**Fábio Henrique Rodrigues da Silva**

**Fábio Henrique Rodrigues da Silva**

**Aplicação de Modelos Numéricos para  
Estimativa de Recalques de uma Célula do  
Aterro Sanitário de Belo Horizonte**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Gerenciamento de Resíduos Sólidos

Orientador: Prof. Gustavo Ferreira Simões

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2010

S586a

Silva, Fábio Henrique Rodrigues da.

Aplicação de modelos numéricos para estimativa de recalques de uma célula do Aterro Sanitário de Belo Horizonte [manuscrito] / Fábio Henrique Rodrigues da Silva. – 2010.  
x, 105 f., enc.: il.

Orientador: Gustavo Ferreira Simões.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f.100-105.

Bibliografia: f. 97-99.

1. Engenharia sanitária – Teses. 2. Meio ambiente – Teses.  
3. Resíduos sólidos – Teses. I. Simões, Gustavo Ferreira. II.  
Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.  
III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

*Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos*

*Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL*

*Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br*

*http://www.smarh.eng.ufmg.br*

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Aplicação de Modelos Numéricos para Estimativa de Recalques de uma Célula do Aterro Sanitário de Belo Horizonte

**FÁBIO HENRIQUE RODRIGUES DA SILVA**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:


  
Prof. GUSTAVO FERREIRA SIMÕES

  
Profª LISÉTE CELINA LANGE


  
Prof. ROBERTO FRANCISCO AZEVEDO

  
Prof. FELÍCIO BRUZZI BARROS

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

  
Prof. Mauro da Cunha Naghettini  
Coordenador

Versão Final aprovada por

  
Prof. Gustavo Ferreira Simões  
Orientador

Belo Horizonte, 01 de março de 2010.

## AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio, incentivo e amor dedicado a mim, durante os meus 26 anos. À minha mãe, pela abdicação profissional, que resultou em meu crescimento como pessoa, pela base ética e educacional a mim repassada. Aos meus irmãos, pelo exemplo acadêmico que proporcionaram, mesmo sem perceberem. Ao meu pai, pela exigência com relação aos estudos e pelo respeito em relação à instituição a que pertenci. À Deus, pela iluminação que ele nos dá a cada dia.

À amigos que convivi durante esses anos na Pós-Graduação (André Wilhiam, Margarita Maria, Laila Agresta, Marília, Fernando Assunção, André Pereira, Uende Figueiredo, dentre outros).

Ao bolsista de iniciação científica, Hugo. No tempo em que esteve presente, pela prontidão das respostas de e-mails e pela competência em computação, que não foi possível aproveitarmos de forma mais significativa.

Ao Professor Gustavo Simões pela compreensão, paciência, disponibilidade, conversas técnicas informais e orientação de aspectos pertinentes à dissertação, ao conhecimento de engenharia e às escolhas que tanto me assolaram nessa fase de minha vida.

À professora Liséte Lange por esclarecimentos referentes às questões pertinentes ao programa SMARH e aspectos técnicos e, sobretudo, pessoais, pertinentes.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Estruturas (Roque, Estevam Las Casas e Felício), pela prontidão relativa à solução das dúvidas, na fase inicial e mais nebulosa do projeto.

À Superintendência de Limpeza Urbana (SLU) da Prefeitura de Belo Horizonte, pelo total apoio ao projeto e pela disponibilização dos dados do aterro sanitário e ao Eng. Cícero Catapreta, por esclarecimentos de dúvidas e informações importantes durante a realização da pesquisa.

Enfim, obrigado a todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para a realização desse trabalho.

## RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação do modelo unidimensional acoplado mecânico e biológico, desenvolvido por Simões (2000) e de modelos bidimensionais elásticos linear e não linear (hiperbólico) para avaliação de recalques em aterros sanitários. No modelo de Simões (2000), os deslocamentos verticais são obtidos por duas componentes: uma mecânica, devida à aplicação de sobrecargas e ao comportamento viscoso dos resíduos, e outra biológica, resultado de processos de biodegradação dos resíduos. O modelo considera as propriedades das frações constituintes dos resíduos, permitindo a análise de problemas onde a composição e as condições operacionais variam com o tempo. Os modelos bidimensionais elásticos utilizam parâmetros da teoria da elasticidade e possibilitam a modelagem de deslocamentos horizontais. No entanto, eles não incorporam a parcela dos recalques resultantes dos processos de biodegradação. Os modelos foram usados na calibração e simulação da célula AC-05, do Aterro Sanitário da BR-040 em Belo Horizonte/MG. Inicialmente foram sistematizados os registros do histórico de enchimento da célula e dos recalques, oriundos de um extenso programa de monitoramento geotécnico e operacional. As primeiras estimativas dos parâmetros elásticos dos resíduos foram obtidas na literatura. Em seguida, foram realizadas a calibração e a simulação, objetivando a avaliação do desempenho dos modelos na previsão de recalques de longo prazo e ganho de vida útil durante o enchimento. Além disso foi realizada uma discussão de aspectos que devem ser incorporados na interpretação de registro de monitoramento, para uma melhor estimativa de recalques e avaliação das condições de estabilidade geotécnica. O modelo unidimensional apresentou bons resultados para avaliação dos deslocamentos verticais, em que somente em 5 dos 28 medidores de recalques a diferença entre os valores medidos e simulados foram superiores a 30%. Os modelos bidimensionais elásticos não forneceram resultados satisfatórios para a previsão dos recalques de longo prazo. Para o ganho de vida útil durante a fase de enchimento, os resultados foram satisfatórios. Em campo, obteve-se 28% de ganho de volume útil durante a fase de enchimento, contra 30% dos obtidos na simulação com o modelo elástico não linear (hiperbólico) e 33% obtidos com o modelo unidimensional, sugerindo a aplicabilidade desse modelo. Observou-se também a importância da consideração do tempo que decorre entre a construção dos alteamentos e o início do monitoramento de recalques. Quando considerado tal aspecto, foram obtidas deformações específicas com um comportamento mais uniforme em relação às deformações verticais específicas.

## ABSTRACT

This study presents the application of a coupled mechanical and biological one-dimensional model, developed by Simões (2000), and two-dimensional linear and non-linear (hyperbolic) elastic models to assess settlements in municipal solid waste landfills. In the model of Simões (2000), the vertical settlements are obtained by two components: a mechanical, due to the application of loads and the viscous behavior of the waste, and a biological, resulting from waste biodegradation processes. The model considers the properties of the waste fractions, enabling the analysis of problems where composition and operating conditions vary with time. The elastic models use two-dimensional theory of elasticity parameters and enable the modeling of horizontal displacements; however, they do not incorporate the portion of settlements resulting from biodegradation processes. The models were used in the calibration and simulation of Cell AC-05, at BR-040 Landfill in Belo Horizonte/MG. Initially, filling history and settlements records, obtained from a comprehensive geotechnical and operational monitoring program, were organized. Initial estimates of the elastic parameters of waste were obtained in the literature. Then, calibration and simulation were carried out, aiming at assessing the performance of the models in the prediction of long-term settlements and increase in volume during filling. A discussion of aspects that should be incorporated in the interpretation of monitoring record for a best estimate of settlements and evaluation of geotechnical stability conditions are also presented. The one-dimensional model showed good results for vertical settlements with only 5 out of 28 settlement plates presenting differences between measured and simulated values higher than 30%. The two-dimensional elastic models have not provided satisfactory results for prediction of long-term settlements. Concerning the increase in volume or gain in lifespan during the filling phase, the results were satisfactory. In the field, a 28% increase in volume was observed during the filling phase, compared to 30% obtained in the simulation with the non-linear elastic model (hyperbolic) and 33% obtained with the one-dimensional model, suggesting the applicability of this model. It was also noted the importance of considering the time between the construction of waste layers and the start of settlement monitoring. When considered this aspect, specific vertical deformations with a more uniform behavior were obtained.



# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	ix
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 OBJETIVOS .....	3
2.1 Gerais .....	3
2.2 Específicos .....	3
3 REVISÃO DE LITERATURA .....	4
3.1 A problemática dos recalques de RSU .....	4
3.2 Monitoramento de aterros sanitários .....	5
3.2.1 Monitoramento ambiental .....	7
3.2.2 Monitoramento operacional .....	9
3.2.3 Monitoramento geotécnico.....	10
3.3 Monitoramento de deslocamentos.....	12
3.3.1 Inclinômetros.....	12
3.3.2 Placas de recalque .....	13
3.4 Propriedades dos resíduos sólidos urbanos .....	14
3.4.1 Métodos de obtenção de parâmetros de compressibilidade .....	14
3.5 Propriedades mecânicas e biológicas dos RSU.....	18
3.5.1 Modelos unidimensionais.....	22
3.6 Análises de problemas tensão x deformação.....	29
3.6.1 Modelos lineares-elásticos .....	29
3.7 Características dos RSU observadas em ensaios triaxiais.....	32
3.7.1 Influência da tensão de confinamento .....	32
3.7.2 Influência da idade .....	33
3.8 Modelos fisicamente não-lineares.....	34
3.8.1 Modelo hiperbólico .....	34
3.8.2 Modelos elasto-plásticos .....	37
3.9 Estudos recentes de modelos bidimensionais e tridimensionais .....	41
3.9.1 Modelo proposto por Machado <i>et al.</i> (2008).....	41
3.9.2 Modelo proposto por McDougall (2007) .....	45
3.10 O Método dos elementos finitos (MEF).....	47
4 METODOLOGIA .....	50
4.1 Área de estudo.....	50
4.2 Análise dos registros de monitoramento .....	51

4.2.1	Influência da correção das datas e cotas de construção e início de monitoramento.....	51
4.2.2	Análise conjunta de deslocamentos verticais e horizontais.....	54
4.3	Análises com o programa ANSYS .....	55
4.3.1	Estimativa de parâmetros de RSU.....	57
4.3.2	Estimativa de parâmetros do dique e do solo .....	57
4.4	Análises com o programa SIGMA/W .....	58
4.4.1	Análise pelo modelo elástico linear.....	58
4.4.2	Análise pelo modelo hiperbólico.....	58
4.5	Análise unidimensional .....	66
4.5.1	Cálculo de volumes ganhos pelo recalque .....	68
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	70
5.1	Interpretação dos registros de monitoramento .....	70
5.2	Análise conjunta das movimentações verticais e horizontais.....	75
5.3	Influência dos regimes de pequenos e grandes deslocamentos .....	77
5.3.1	Aspectos preliminares dos deslocamentos horizontais e verticais .....	79
5.4	Análises com o modelo elástico linear .....	81
5.5	Modelo hiperbólico .....	83
5.6	Cálculo do volume útil .....	85
5.7	Deslocamentos horizontais.....	87
5.8	Calibração do modelo unidimensional .....	89
5.8.1	Cálculo do volume útil ganho .....	93
6	CONCLUSÕES.....	94
7	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	97
	ANEXOS.....	100
A.	Gráficos deslocamento vertical x deslocamento horizontal .....	100
B.	Deslocamentos verticais calibrados com modelo 1D.....	102
C.	Evolução dos deslocamentos horizontais monitorados .....	104

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Desenho esquemático de setores do aterro.....	9
Figura 3.2 – Aspectos anômalos detectáveis por inspeção visual (Jorge <i>et al.</i> , 2004).....	11
Figura 3.3 – Instrumentos de medição do nível de líquidos e gases (Jorge <i>et al.</i> , 2004).....	11
Figura 3.4 – Inclinômetro (Aires, 2006).....	12
Figura 3.5 – Desenho esquemático da placa de recalque.....	13
Figura 3.6 – Placa de recalque no aterro de Belo Horizonte.....	13
Figura 3.7 – Esquema da movimentação dos medidores de recalque.....	14
Figura 3.8 – Consolidômetro de grandes dimensões usado em ensaios de compressão confinada (Nascimento <i>et al.</i> , 2007).....	15
Figura 3.9 – Visões na cobertura intermediária dos RSU em aterros.....	19
Figura 3.10 - Modelos unidimensionais de recalques de aterros sanitários.....	24
Figura 3.11 – Modelo Reológico Compósito Marques (2003).....	26
Figura 3.12 – Exemplo de Interface do programa de recalque unidimensional do modelo acoplado mecânico-biológico (Simões e Lanes, 2009).....	28
Figura 3.13 – Evolução das altura do aterro em função do tempo (Simões & Lanes, 2009).....	29
Figura 3.14 – Distorção angular provocada em um elemento plano (Sadd, 2000).....	32
Figura 3.15 – Diagrama tensão desviadora x deformação axial (Marques, 2001).....	33
Figura 3.16 – Materiais fisicamente não-lineares (Lourenço, 1999).....	34
Figura 3.17 – Modelo hiperbólico (Duncan e Chang, 1970).....	35
Figura 3.18 – Gráfico do modelo hiperbólico linearizado (Duncan e Chang, 1970).....	35
Figura 3.19 – Representação da equação de Janbu (Duncan e Chang, 1970).....	36
Figura 3.20 – Valores do módulo de variação volumétrica em função do confinamento (Duncan e Chang, 1970).....	37
Figura 3.21 – Diagrama tensão x deformação de um material plástico (Mase, 1970).....	38
Figura 3.22 – Sistema massa-mola para representação de modelo elasto-plástico (Lourenço, 1999).....	38
Figura 3.23 – Representação do vetor gradiente da função de plastificação (Lourenço, 1999).....	40
Figura 3.24 – Influência da perda de massa sobre o volume de resíduos (Machado <i>et al.</i> , 2008).....	42
Figura 3.25 – Influência das fibras no reforço dos RSU (Kolsch, 1995 <i>apud.</i> Machado <i>et al.</i> , 2008).....	43
Figura 3.26 - Influência do valor de $\Lambda$ sobre o endurecimento dos RSU (McDougall, 2007).....	44
Figura 3.27 – Influência da trajetória de tensões sobre $P_f$ e $V_f$ (Machado <i>et al.</i> , 2008).....	44
Figura 3.28 – Ensaios oedométricos com descarregamento em RSU (Kavazanjian, 1999 <i>apud.</i> McDougall 2007).....	46
Figura 3.29 – Comportamento visco-elastoplástico com endurecimento devido ao fenômeno de creep (McDougall, 2007).....	46
Figura 4.1 – <i>Layout</i> geral da CTRS da BR-040.....	50
Figura 4.2 – Visão geral dos taludes AC-03, AC-04 e AC-05 (em primeiro plano).....	51
Figura 4.3 – Localização das placas de recalques na Célula AC-05.....	52
Figura 4.4 – Esquema da interpretação realizada.....	53
Figura 4.5 – Padrão de movimentações esperado.....	55
Figura 4.6 – Geometria utilizada.....	56
Figura 4.7 – Geometria discretizada.....	56
Figura 4.8 – Resultados utilizados na calibração do modelo hiperbólico (Nascimento, 2007).....	59
Figura 4.9 – Aproximações das curvas tensão x deformação com o modelo hiperbólico.....	62
Figura 4.10 – Aproximações das curvas ( $\epsilon_v$ x $\epsilon_1$ ) com o modelo hiperbólico.....	63
Figura 4.11 - Critérios de convergência usados nas simulações com o programa SIGMA/W.....	63
Figura 4.12 – Modo de obtenção das forças nodais no incremento de carregamento 2.....	65
Figura 4.13 – Desenho para cálculo do ganho de volume devido aos recalques.....	69
Figura 5.1 - Deformações verticais específicas considerando o momento de início do monitoramento.....	70
Figura 5.2 - Deformações verticais específicas considerando o momento de construção dos alteamentos.....	71
Figura 5.3 - Deformações específicas do agrupamento 1.....	72
Figura 5.4 - Deformações específicas do agrupamento 2.....	72
Figura 5.5 – Deformações específicas do agrupamento 3.....	73

Figura 5.6 – Deslocamentos verticais a partir da data de início do monitoramento de recalques .....	74
Figura 5.7 – Deslocamentos verticais a partir da construção dos alteamentos .....	74
Figura 5.8 - Deslocamento vertical x deslocamento horizontal da Placa 5.9 .....	76
Figura 5.9 – Gráfico deslocamento vertical x deslocamento horizontal da Placa 5.1.....	77
Figura 5.10 – Recalques verticais no regime de pequenos deslocamentos.....	77
Figura 5.11 – Recalques verticais no regime de grandes deslocamentos .....	78
Figura 5.12 – Recalques horizontais no regime de pequenos deslocamentos.....	78
Figura 5.13 – Recalques horizontais no regime de grandes deslocamentos .....	79
Figura 5.14 – Vetor deslocamento resultante do regime de pequenos deslocamentos .....	79
Figura 5.15 – Vetor deslocamento resultante de regime de grandes deslocamentos .....	79
Figura 5.16 – Deslocamento horizontal de pontos genéricos do aterro .....	80
Figura 5.17 – Deslocamento vertical de pontos genéricos do aterro .....	80
Figura 5.18 – Recalques verticais em uma análise incremental com o modelo linear elástico sem ajuste de cotas .....	81
Figura 5.19 – Recalques verticais numa análise incremental com o modelo linear elástico com ajuste de cotas .....	82
Figura 5.20 – Módulos de Elasticidade (kPa) no último passo de carga .....	83
Figura 5.21 – Evolução do módulo de elasticidade com os incrementos de carregamento.....	83
Figura 5.22 – Deslocamentos verticais com o modelo hiperbólico .....	84
Figura 5.23 – Módulo de Elasticidade (kPa) no primeiro incremento de carregamento .....	86
Figura 5.24 – Deslocamentos horizontais com o modelo elástico.....	88
Figura 5.25 – Deslocamentos horizontais com o modelo hiperbólico.....	88
Figura 5.26 – Degradabilidade potencial em função da profundidade (McDougall, 2009).....	91
Figura 5.27 – Estabilização dos deslocamentos verticais .....	92
Figura 5.28 – Perfil crescente dos recalques verticais .....	92
Figura 5.29 – Evolução da altura do aterro.....	92
Figura 5.30 – Evolução dos pesos específicos dos alteamentos.....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores típicos de $C_c$ e $C_\alpha$ (Simões, 2000).....	16
Tabela 3.2 – Resultados de ensaios triaxiais para RSU com $\gamma = 8\text{kN/m}^3$ (Nascimento, 2007) .....	34
Tabela 3.3 – Resultados de ensaios triaxiais de RSU com $\gamma = 10\text{kN/m}^3$ (Nascimento, 2007) .....	34
Tabela 4.1 – Data de construção dos alteamentos .....	54
Tabela 4.2 – Propriedades dos materiais .....	56
Tabela 4.3 – Módulo de Elasticidade para diferentes tensões confinantes.....	57
Tabela 4.4 – Coeficiente de Poisson para diferentes tensões confinantes .....	57
Tabela 4.5 – Resultados de ensaios triaxiais utilizados na calibração do modelo hiperbólico.....	59
Tabela 4.6 – Valores dos módulos de elasticidade inicial em função da tensão confinante.....	60
Tabela 4.7 – Novos parâmetros do modelo hiperbólico .....	61
Tabela 4.8 – Coeficientes de deformação volumétrica do modelo hiperbólico, para cada tensão confinante	62
Tabela 4.9 – Origem dos RSU de Belo Horizonte (Simões <i>et al.</i> , 2004) .....	66
Tabela 4.10 – Composição gravimétrica do aterro de BH (Simões <i>et al.</i> , 2004) .....	66
Tabela 4.11 – Agrupamento dos materiais constituintes pela velocidade de biodegradação .....	67
Tabela 4.12 – Percentuais dos agrupamentos de RSU .....	67
Tabela 4.13 – Valor das taxas de biodegradação das frações constituintes do RSU.....	67
Tabela 5.1 – Percentual de recalques verticais elásticos .....	82
Tabela 5.2 – Percentual de recalques elásticos no modelo hiperbólico.....	84
Tabela 5.3 – Áreas úteis ganhas na Célula AC-05 durante o enchimento.....	85
Tabela 5.4 – Áreas úteis ganhas na Célula AC-05 durante o enchimento (elástico linear).....	87
Tabela 5.5 – Comparação entre deslocamentos horizontais obtidos com o modelo elástico linear e hiperbólico. ....	88
Tabela 5.6 – Deslocamentos verticais obtidos na simulação 1D.....	90

## LISTA DE SÍMBOLOS

- a: Inverso da inclinação inicial no modelo hiperbólico ( $\text{kPa}^{-1}$ )  
b: Inverso do valor assintótico no modelo hiperbólico ( $\text{kPa}^{-1}$ )  
b\*: Coeficiente de compressão secundária  
B: Coeficiente de variação volumétrica (kPa)  
BP: Biodegradabilidade potencial  
c\*: Taxa de compressão mecânica secundária  
c: Coesão (kPa)  
C<sub>c</sub>': Coeficiente de compressão mecânica primária  
C<sub>α</sub>: Coeficiente de compressão mecânica secundária  
d: Taxa de compressão biológica secundária  
e: Índice de vazios  
E: Módulo de Elasticidade (MPa)  
E<sub>DG</sub>: Deformação máxima que pode ocorrer devido à biodegradação  
E<sub>i</sub>: Módulo de Elasticidade Inicial para certa tensão confinante (kPa)  
f: função de cedência  
g: Função potencial plástico  
G: Módulo de Elasticidade Transversal (MPa)  
K: Parâmetro adimensional da equação de Janbu  
K<sub>B</sub>: Parâmetro adimensional  
K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> e K<sub>3</sub>: Taxas de biodegradabilidade ( $\text{ano}^{-1}$ )  
h: Coeficiente linear do gráfico  $p_{\text{rupt}} \times q_{\text{rupt}}$  (kPa)  
m: Parâmetro adimensional  
m<sub>so</sub>: Massa de sólidos inicial (kg)  
n: Parâmetro adimensional da equação de Janbu  
p: Tensões normais médias (kPa)  
q: Tensão desviadora (kPa)  
Pa: Pressão atmosférica (kPa)  
R<sub>f</sub>: Razão de ruptura  
t': Tempo a partir da aplicação do carregamento (ano)  
t'': Tempo a partir da disposição dos resíduos (ano)  
v: Coeficiente de Poisson  
m: Direção do escoamento plástico  
n: Vetor gradiente da função de cedência no ponto correspondente aos estados de tensão  
σ: Tensor de tensões  
α: Ângulo de inclinação do gráfico  $p_{\text{rupt}} \times q_{\text{rupt}}$  (graus)  
α(t): Parcela da compressão de longo termo relacionada à perda de massa  
α\*: Taxa de incremento da compressão de longo termo  
Δm<sub>s</sub>: Variação da massa de sólidos (Kg)  
Δσ: Incremento de tensão vertical (kPa)  
ε<sub>B</sub>: Deformação de biodegradação  
ε<sub>c</sub>: Deformação de creep  
ε<sub>P</sub>: Deformação instantânea  
ε<sub>1</sub>: Deformação em um dos eixos principais  
ε<sub>v</sub>: Deformação volumétrica  
ε<sub>xx</sub>, ε<sub>yy</sub> e ε<sub>zz</sub>: Deformação nas direções x, y e z  
φ: Ângulo de atrito  
γ<sub>s</sub>: Peso específico dos sólidos ( $\text{kN/m}^3$ )  
γ<sub>sf</sub>: Peso específico das fibras ( $\text{kN/m}^3$ )

$\gamma_{sp}$ : Peso específico da pasta ( $\text{kN/m}^3$ )  
 $\lambda$ : Magnitude do escoamento plástico  
 $\sigma_0$ : Tensão vertical inicial (kPa)  
 $\sigma$ : Tensão normal (kPa)  
 $\sigma_1, \sigma_3$ : Tensões normais principais (kPa)  
 $\sigma_d$ : Tensão desviadora (kPa)  
 $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ : Tensões normais nas direções x, y e z (kPa)  
 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ : Tensão desviadora de ruptura (kPa)  
 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ : Valor assintótico da função que define o modelo hiperbólico (kPa)  
 $\tau$ : Tensão cisalhante (kPa)  
 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ : Tensões cisalhantes nos planos xy, xz e yz (kPa)  
 $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ : Deformação angular nos planos xy, xz e yz

# 1 INTRODUÇÃO

O aumento populacional traz consigo o aumento da quantidade de resíduos gerados. Além disso, a industrialização e o consumismo cada vez mais exacerbados elevam a geração per capita de resíduos. Outro ponto importante a ser considerado é a diversificação dos materiais que dão origem aos produtos industrializados. Tais problemas são um dos principais entraves no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (GRSU) atualmente.

O GRSU é composto de um conjunto de etapas diferenciadas, quais sejam: acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e destinação final. A última etapa será o enfoque único da presente pesquisa. Nela, estão incluídas algumas formas diferenciadas de destinação, tais como a disposição em lixões, aterros controlados e aterros sanitários.

Os lixões são um meio de destinação extremamente agressivo nos aspectos sócio-ambientais. Nele, os resíduos ficam expostos a céu aberto, não sendo adotados quaisquer procedimentos para reduzir seus impactos negativos. Com isso, devido aos processos de decomposição dos resíduos sólidos urbanos (RSU), são gerados líquidos lixiviados e gases. Os primeiros podem percolar pelo solo e atingir as águas subterrâneas e/ou corpos d'água superficiais. Além disso, pode ocorrer a contaminação do ar, pela dissipação dos gases oriundos dessa decomposição. A presença de catadores também é constante nesses locais. Com isso, as pessoas ficam expostas a várias enfermidades, devido à presença de ratos, moscas e pássaros, além de outros agentes transmissores de doenças.

Os aterros sanitários são os métodos de disposição em solo mais adequados para os RSU, por serem os mais corretos e ambientalmente, os mais seguros. Inicialmente, há a preparação do terreno e a implantação do sistema de impermeabilização de base. Essa medida diminui a possibilidade de contaminação das águas subterrâneas pelos líquidos lixiviados. Esses líquidos são coletados pelo sistema de drenagem interno do aterro sanitário e conduzidos ao sistema de tratamento, podendo ser eventualmente recirculados na própria massa. Os drenos verticais, também conduzem os gases para fora do aterro. Seus destinos finais podem ser dois, uma unidade de tratamento, que faz o reaproveitamento do biogás, ou queimadores. Em sua operação diária consta a cobertura dos resíduos, que objetiva evitar a proliferação de vetores, o mau cheiro e a poluição. A presença de catadores também é monitorada, por meio de vigilância, controle de acesso e fechamento do local.



Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), em 2000, estima-se que foram gerados no ano 2000, cerca de 150 mil toneladas de lixo domiciliar e comerciais por dia e que 80% dos RSU eram coletados. Dentre eles, 47% têm como destinação final os aterros sanitários. Contudo, apenas 13% dos municípios possuíam aterros sanitários.

A Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, ligada ao Ministério das Cidades, fez uma análise dos dados de duas pesquisas da PNSB, realizadas nos anos de 1989 e 2000. A ideia geral apresentada é a de que aumentou significativamente a massa de resíduos coletados e que tiveram como destino final os aterros sanitários. Em 1989, apenas 15,8% deles foram aterrados adequadamente, enquanto que 11 anos depois, o percentual subiu para 47,1%. Além disso, a massa total de resíduos coletados passou de 100 mil para 150 mil toneladas, nos anos de pesquisa já citados.

Em outras palavras, pode-se concluir que houve uma melhora significativa no sistema de coleta de resíduos na última década do século passado. Não obstante, também se observa uma pequena geração de resíduos por municípios que não apresentam aterros sanitários. Geralmente, essas obras de engenharia pertencem às cidades maiores, com maior disponibilidade de recursos técnicos e financeiros, além de possuírem uma maior população, que gera maior quantidade de resíduos. Isso se confirma quando se levam em consideração os municípios que têm população inferior a 20 mil habitantes, que no ano 2000, eram 4026. Eles depositavam 68,5% dos resíduos coletados em lixões. Contudo, esse montante representava apenas 12,8% dos resíduos coletados no país.

Como se pode notar, a quantidade de resíduos que vêm sendo disposta em aterros sanitários tem aumentado progressivamente. Contudo, a disponibilidade de espaço para serem construídos, ou mesmo ampliados os aterros existentes no Brasil, tem sido cada vez menor. Isso está resultando em aterros cada vez mais altos, sendo necessários estudos detalhados sobre a estabilidade dos taludes construídos, ou mesmo dos recalques que estão associados à massa de resíduos aterrada. No aterro de Bandeirantes em São Paulo, por exemplo, algumas células chegam a alturas superiores a 100 metros.

Devido à indisponibilidade de áreas para a construção dessas grandes obras de engenharia, à sua crescente importância no contexto brasileiro e ao pequeno número de modelos matemáticos bidimensionais e tridimensionais para a descrição do comportamento geomecânico dos RSU, em especial à avaliação de recalques, estão pautadas as justificativas para o desenvolvimento desse trabalho.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Gerais**

- Avaliar a aplicação de modelos numéricos para a estimativa de recalques em aterros sanitários.

### **2.2 Específicos**

- Sistematizar os registros do histórico de enchimento e do monitoramento de recalques da Célula AC-05 do Aterro Sanitário da Central de Tratamento de Resíduos da BR-040 em Belo Horizonte;
- Avaliar o desempenho de modelos elásticos lineares e não lineares bidimensionais na previsão de recalques durante a fase de enchimento da Célula AC-05;
- Avaliar o desempenho de um modelo unidimensional acoplado mecânico e biológico na previsão dos recalques durante a fase enchimento e após o fechamento da Célula AC-05;
- Avaliar o ganho de vida útil obtido com os modelos de previsão, comparando-os com o observado em campo;
- Avaliar a influência do regime de pequenos e grandes deslocamentos no cálculo dos recalques horizontais e verticais utilizando modelo elástico linear;
- Discutir aspectos que devem ser incorporados na interpretação de registros de monitoramento de recalques em aterros sanitários, que contribuam para uma melhor estimativa de recalques e avaliação das condições de estabilidade geotécnica.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 *A problemática dos recalques de RSU*

Marques (2001) menciona que para o entendimento do comportamento geomecânico dos RSU, que são materiais extremamente heterogêneos, mutáveis com o tempo e com as condições ambientais, é necessário se fazer ensaios de campo, uma vez que dificilmente se conseguirá reproduzir em laboratório as características locais, quer seja pelas peculiaridades do material (heterogeneidade, dimensão das partículas, dentre outras), quer seja pela impossibilidade de simular o histórico de tensões, a drenagem de líquidos e gases etc. Isso reforça a importância de se trabalhar com dados de campo para prever o comportamento dos recalques em RSU.

Outra justificativa que pauta o desenvolvimento desses estudos está na problemática da escolha das áreas para a implantação e operação dos aterros sanitários. Dificilmente os municípios conseguem disponibilidade de regiões adequadas para a construção dos aterros. Existem inúmeros aspectos que devem ser considerados para a definição da área de implantação de um aterro sanitário. Alguns deles são a não-presença de aeroportos nas adjacências; não estar localizado em áreas de risco de inundação ou instabilidade de encostas ou em zonas de maior vulnerabilidade à contaminação subterrânea, tais como as formações cársticas. Dentre os aspectos desejáveis podem ser citados: regiões que tenham lençóis freáticos mais profundos, solos pouco permeáveis, pouca distância do centro gerador de resíduos, boa acessibilidade para veículos pesados, geometria local mais adequada, área disponível total para a disposição dos resíduos, dentre outros. Caso haja necessidade de aprofundamento acerca da escolha de áreas a serem licenciadas para os aterros sanitários, recomenda-se a leitura de Monteiro *et al.* (2001).

O que se tenta chamar a atenção em todos esses critérios, é que dificilmente se encontrará uma área totalmente adequada para a construção dessa obra de engenharia. Toma-se o exemplo do Aterro Sanitário de Belo Horizonte, que teve seu primeiro licenciamento no ano de 1997, com previsão de funcionamento até 2003. Por problemas na escolha da nova área que seria licenciada, além do ganho de volume útil que estava ocorrendo em virtude dos recalques, seu funcionamento se estendeu até o ano de 2007. Tal fato ocorreu por alguns aspectos já descritos: dificuldade de se encontrar e de se licenciar áreas disponíveis para a construção e o ganho de volume útil durante a operação e fechamento do aterro, até que se atingisse a cota de projeto do empreendimento. A literatura tem apresentado valores de

recalque de maciços de RSU, somente devido ao peso próprio e à biodegradação, variando entre 10 e 40%, dependendo do tipo de resíduo e da eficiência da compactação.

Grandes problemas são causados pelos recalques, sobretudo os diferenciais. A presença desses causa o aparecimento de esforços indesejáveis, que podem ocasionar problemas na integridade dos componentes do aterro, principalmente dos sistemas de drenagem pluvial, de líquidos e de gases, além de problemas na cobertura final, dentre outros.

Outro ponto que está indiretamente ligado aos recalques superficiais é a estabilidade dos taludes. Embora a conformação original seja mais instável, sob o ponto de vista da inclinação dos taludes, o monitoramento da evolução dos recalques verticais e horizontais em conjunto permite que movimentos indicativos de problemas de instabilidade sejam observados.

Existem inúmeros relatos de escorregamentos em maciços de RSU. Cepollina *et al.* (2004) pontuam algumas dessas ocorrências, como os que ocorreram nas Filipinas, no ano 2000 e em La Coruña, no ano de 1996. No Brasil, são reportadas ocorrências em Itaquaquecetuba no ano 2000 e em São Paulo, no aterro Bandeirantes, em 1991, dentre outras. Essas rupturas são extremamente perigosas, pois, as massas rompidas podem se deslocar a grandes velocidades e ter alcances bem elevados, colocando em risco vidas e propriedades. Recentemente, foi observado o escorregamento do aterro São João, no Estado de São Paulo.

Esses escorregamentos podem ser previstos, a partir de cálculos prévios de estabilidade e monitoramento de parâmetros que permitem avaliar as condições de segurança do maciço. Cepollina *et al.* (2004) lista alguns parâmetros que podem ser úteis nessa análise: levantamentos planialtimétricos, determinação nos níveis piezométricos e das pressões de gases no interior dos maciços, além de parâmetros geomecânicos dos materiais envolvidos (parâmetros de resistência e pesos específicos).

### **3.2 Monitoramento de aterros sanitários**

O monitoramento de aterros sanitários é uma prática que vem sendo desenvolvida no Brasil, sobretudo nas duas últimas décadas. Algumas dessas obras de engenharia apresentam instrumentação e pessoal técnico capacitado para a realização dessas tarefas. Cepollina *et al.* (2004) listam alguns dos aterros em operação que possuem bons planos de monitoramento: Bandeirantes e Sítio São João (São Paulo), Extrema em Porto Alegre (RS), Gramacho no município do Rio de Janeiro, o Salvador e Camaçari (BA), Muribeca (Recife) e, em menores proporções, Caxias do Sul (RS), Joinville (SC) e de Santo André (SP).

Nos aterros sanitários, o monitoramento deve ser algo sistemático e abrangente, pois, certos aspectos ambientais podem causar diferentes impactos ambientais. Além disso, o somatório de certos aspectos potencializa o efeito de alguns impactos negativos.

Catapreta e Simões (2006) dividem os monitoramentos de um aterro sanitário em três tipos: ambiental, operacional e geotécnico. O primeiro se divide em qualidade do ar, das águas subterrâneas e superficiais, de pressão sonora, líquidos lixiviados, gases, dados climáticos, vazões de líquidos e gases. O segundo envolve a determinação de parâmetros operacionais, tais como a densidade dos resíduos aterrados. O monitoramento geotécnico envolve a realização de ensaios de campo e laboratório nos diversos materiais utilizados na construção do aterro além dos RSU, medidas das movimentações (recalques) superficiais e internas, registro das poro-pressões devido aos líquidos e aos gases no interior do maciço de resíduos, dentre outros.

Segundo os mesmos autores, as principais etapas de um programa de monitoramento de um aterro sanitário são:

- Definição do padrão de desempenho geomecânico (p.ex.: comportamento das deformações) e ambiental (p.ex.: atendimento à legislação pertinente) esperados;
- Definição dos indicadores e parâmetros para análise de desempenho;
- Definição e obtenção dos dados necessários para análise e interpretação dos desempenhos geotécnico e ambiental;
- Análise e interpretação dos dados obtidos e comparação com os padrões de desempenho esperados e de referência de qualidade ambiental;
- Aplicação dos resultados para a operação, conservação e manutenção do aterro: medidas preventivas e corretivas, e de remediação de áreas que eventualmente apresentem alterações na qualidade ambiental ou desempenho geomecânico inadequado.

Após o encerramento do recebimento de resíduos, deve-se apresentar um Plano de Encerramento, onde são definidos os procedimentos para a conservação e manutenção, integrados a um programa de controle geotécnico e ambiental do aterro. Com isso, são definidas estratégias para o aproveitamento futuro da área. A continuidade do Plano de Monitoramento após o fechamento do aterro é pertinente devido à ocorrência dos recalques horizontais e verticais, e a geração de líquidos lixiviados e gases. A frequência de leituras

pode ser reduzida depois de certo tempo, uma vez que a ocorrência de recalques e a geração de gases e líquidos lixiviados tende à estabilização.

### **3.2.1 Monitoramento ambiental**

O monitoramento ambiental visa identificar alterações nos padrões de qualidade ambiental dos solos, ar, águas subterrâneas e superficiais decorrentes da implantação, operação e após o encerramento do aterro. As atividades devem ser estruturadas e sistematizadas em um plano operacional (Plano de Monitoramento da Qualidade Ambiental), onde devem constar a localização dos pontos de amostragem, frequência e parâmetros a serem analisados, os procedimentos de coleta de amostragem de água e solos, e os parâmetros de análise de padrões de referência a serem adotados.

O monitoramento da qualidade das águas subterrâneas e superficiais tem como objetivo principal o acompanhamento das condições dos mananciais na área de influência do aterro sanitário, tendo a finalidade de verificar a possibilidade de contaminação dos mesmos. As amostras das águas subterrâneas a serem analisadas, são coletadas em poços de monitoramento, instalados em locais definidos a partir dos resultados da interpretação da superfície piezométrica estabelecida no mapa potenciométrico da área do aterro. A periodicidade das análises, bem como a relação de parâmetros para análises físico-químicas e microbiológicas devem ser submetidas à avaliação das autoridades ambientais. Os valores obtidos nessas análises podem ser comparados com os valores máximos permissíveis, tendo como referência o Padrão de Potabilidade do Ministério da Saúde (2004). Cepollina *et. al.* (2004) recomendam atenção especial para os metais: alumínio, cádmio, cobre, bromo, chumbo, ferro, manganês, mercúrio, níquel e zinco, além das diversas formas de nitrogênio e fosfato, resultantes da decomposição da matéria orgânica e do íon cloreto, que tem concentrações muito baixas em ambientes naturais, mas, que pode estar em proporções relevantes nos líquidos lixiviados.

As amostras das águas superficiais devem ser coletadas em pontos de amostragem definidos na direção dos fluxos do escoamento superficial. Jorge *et al.*(2004) colocam que devem ser definidos pelo menos três pontos de amostragem: um à montante do aterro (isento da influência do mesmo), um ponto central à localização do aterro, e um ponto a jusante (sob a influência dele). Os órgãos competentes devem estabelecer a periodicidade e a lista de parâmetros a serem analisados. Os resultados das análises microbiológicas e físico-químicas devem ser comparados com os valores máximos permissíveis definidos pela Resolução CONAMA 357/2005 ou pela legislação estadual, o que for o mais restritivo. As análises

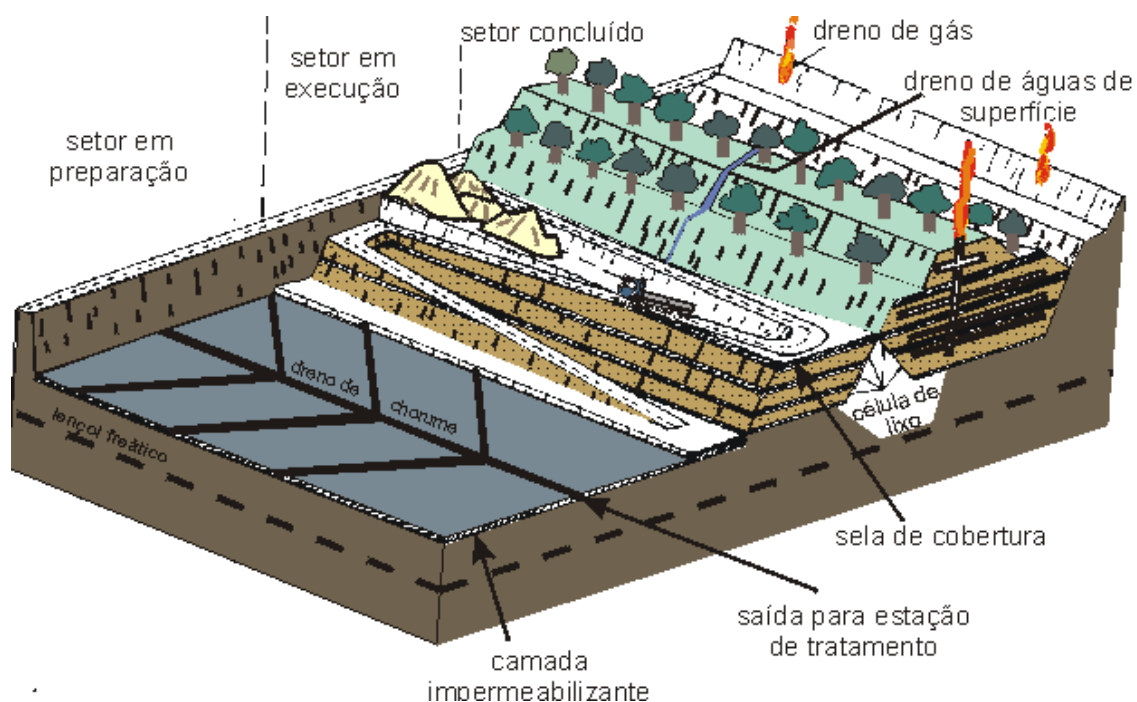
devem comprovar que as águas superficiais coletadas atendem aos padrões de lançamento e são compatíveis com o enquadramento do corpo d'água na classe pertinente, conforme os usos das águas. A poluição das águas superficiais pode ocorrer pela contribuição de um possível lençol subterrâneo contaminado ou pelas águas superficiais que passam pelo aterro. Além dos corpos d'água receptores, pode ser efetuada a coleta e análise de águas que provém de nascentes captadas e drenadas sob o sistema de impermeabilização de base do aterro.

O monitoramento da qualidade do ar é uma matéria que está ainda em consolidação. Não há critérios estabelecidos para a geração de odores, mas, que tem seus efeitos reduzidos pela cobertura contínua dos resíduos e pela drenagem e queima em poços isolados, onde há eliminação de gases como o dióxido de enxofre e as mercaptanas, antes de atingirem a atmosfera (Cepollina *et. al.*, 2004). Uma boa técnica executiva pode compensar a deficiência de critérios para a amostragem e análise de odores. Além delas, Catapreta & Simões (2006) citam o monitoramento das partículas inaláveis (PM10) e totais em suspensão (PTS) como parâmetros pertinentes para a avaliação. Os pontos de captação devem formar uma rede de monitoramento que possibilite estabelecer os valores em pontos dentro do aterro e no seu entorno.

A avaliação da pressão sonora visa estabelecer os níveis de ruído e o tempo à que a comunidade e os trabalhadores internos ao aterro estão sendo expostos. As fontes geradoras são, principalmente, as máquinas e veículos pesados que estejam em constante movimentação no interior do aterro. Conforme Catapreta & Simões (2006), a Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040 (CTRS) de Belo Horizonte faz um monitoramento mensal em 5 pontos de amostragem diferenciados. Como formas de atenuação dos ruídos, os empregados da CTRS utilizam EPI's (Equipamentos de Proteção Individual), além de redução ao tempo de exposição diária ao barulho. As diretrizes para a promoção da saúde ocupacional devem ser baseadas nas normas regulamentadoras do trabalho. Como forma de remediação e prevenção do barulho externo, podem-se construir barreiras de isolamento, estudar as rotinas de trabalho do maquinário para espalhamento e aterramento dos resíduos, fazer uma previsão adequada do histórico de enchimento em células diferenciadas, para haver a mínima superposição entre os ruídos proporcionados por fontes distintas, dentre outros.

Os líquidos lixiviados são monitorados em aspectos qualitativos e quantitativos, por meio da determinação das concentrações das substâncias orgânicas (DBO e DQO), de nitrogênio amoniacal, nitratos, nitritos, além de metais. Além disso, é medida a vazão dos líquidos lixiviados. Todos os parâmetros variam de forma acentuada, principalmente pela composição

dos resíduos, clima e aspectos operacionais e de projeto. O conhecimento de suas características é bastante importante quando se busca estabelecer a forma e as dimensões das estruturas responsáveis pelo seu tratamento. A Figura 3.1 mostra um aterro sanitário em diversos momentos, incluindo a implantação do sistema de impermeabilização e drenagem de líquidos de base, a operação e a condição após o encerramento.



**Figura 3.1** – Desenho esquemático de setores do aterro

### 3.2.2 Monitoramento operacional

O monitoramento operacional envolve o controle de parâmetros operacionais, principalmente a densidade dos resíduos aterrados e, eventualmente, a inclinação das rampas de aterragem.

O primeiro pode ser determinado pela pesagem dos resíduos no sistema de balanças do aterro associados ao volume disposto diariamente, que é obtido por meio de controle topográfico. Esse parâmetro interfere diretamente na vida útil dos aterros e nas análises de estabilidade dos taludes.

O segundo parâmetro do monitoramento operacional está diretamente ligado ao espalhamento e compactação dos resíduos. Inicialmente, os RSU são dispostos em uma área demarcada, com certa inclinação. Depois disso, é feita a compactação, usualmente com o trator de esteira. Ele realiza movimentos ascendentes para promover o processo de redução do índice de vazios dos resíduos. A aferição da inclinação deve ser feita por uma equipe de topografia, medindo-se a altura da pilha de resíduos e o comprimento da mesma. Ela está diretamente ligada à



eficiência de uso dos equipamentos compactadores e à consequente redução de volume de resíduos.

### **3.2.3 Monitoramento geotécnico**

O monitoramento geotécnico de aterros é realizado por meio de inspeções visuais e da leitura de instrumentações pertinentes. Cepollina *et al.* (2004) enumeram três objetivos básicos:

- Obter dados que permitam avaliar a segurança do maciço contra instabilidades e promover ações que se mostrem necessárias;
- Permitir que sejam feitas previsões quanto aos recalques futuros, visando a avaliação da vida útil do aterro ou a utilização futura da área;
- Permitir o desenvolvimento da ciência, fornecendo parâmetros para que se possa produzir procedimentos, normas técnicas, melhorar novos projetos e otimizar a operação dos aterros.

O primeiro passo dentro de um plano de monitoramento geotécnico são as inspeções visuais. É imprescindível a visita de técnicos aos aterros, para observar sinais dos seguintes comportamentos anômalos, tais como:

- Movimentações que se manifestam pela abertura de fissuras e trincas na cobertura das células, pavimentos, canaletas, guias, empoçamentos;
- Ocorrência de erosões na cobertura que podem expor o resíduo;
- Surgência de líquidos nos taludes ou nos elementos de drenagem superficial.

A Figura 3.2 mostra alguns aspectos que podem ser detectados pela inspeção visual, como a ocorrência de trincas e o empoçamento.



**Figura 3.2** – Aspectos anômalos detectáveis por inspeção visual (Jorge *et al.*, 2004)

Dois outros controles importantes são o monitoramento das poro-pressões devidas aos líquidos e aos gases, que ocorrem no interior das células. Para o primeiro, podem ser usados piezômetros, poços e medidores de nível de água. Os gases podem ser inspecionados por piezômetros com utilização de manômetros.

Esses gases podem ser responsáveis por pressões extras no maciço e geração de instabilidades. Eles geram poro-pressões positivas, o que ocasiona a redução das tensões efetivas, as quais são submetidos os materiais. Tal fato culmina numa redução da resistência dos mesmos ao cisalhamento. A Figura 3.3 mostra um piezômetro e um manômetro de gás, respectivamente.



**Figura 3.3** – Instrumentos de medição do nível de líquidos e gases (Jorge *et al.*, 2004)

Também deve ser realizado o controle tecnológico dos materiais geotécnicos utilizados na construção das células do aterro. Ele pode ser viabilizado por meio de ensaios de laboratório (caracterização geotécnica, compactação, permeabilidade, adensamento, cisalhamento direto e compressão triaxial) e de ensaios de campo (controle de compactação e permeabilidade).

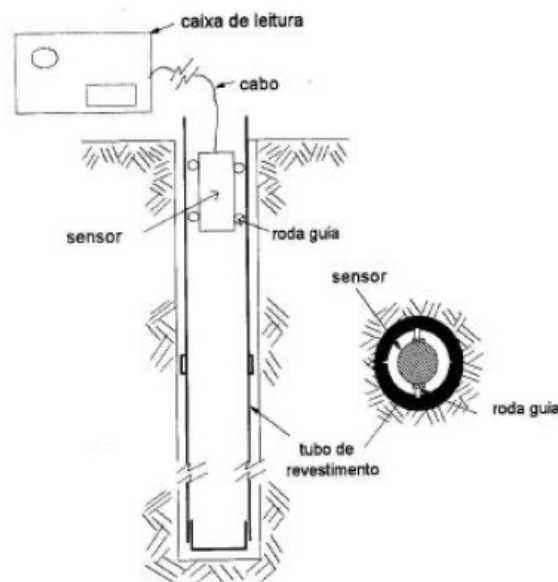
Por último, destaca-se o monitoramento dos recalques superficiais como um tópico específico, que se caracteriza como objetivo principal dessa pesquisa.

### **3.3 Monitoramento de deslocamentos**

Os recalques envolvem as movimentações horizontais e verticais, que podem ser monitorados em superfície e no interior dos maciços. Eles não indicam necessariamente a instabilidade de taludes e corroboram a redução de volume da massa de resíduos aterrados. Nos aterros sanitários, eles são monitorados por dois instrumentos: inclinômetros (movimentações internas) e placas de recalque (movimentações superficiais).

#### **3.3.1 Inclinômetros**

Inclinômetro é um instrumento usado para a medição de deslocamentos horizontais em maciços geotécnicos. Ele é composto por um tubo vertical, com ranhuras diametralmente opostas, que funcionam como guias para uma sonda. O tubo é inserido inicialmente em um furo de sondagem, sendo sua base posicionada em uma camada fixa. Em toda sua extensão, o tubo fica solidarizado ao solo, reproduzindo o seu movimento em duas direções ortogonais. A Figura 3.4 ilustra o aparelho.



**Figura 3.4** – Inclinômetro (Aires, 2006)

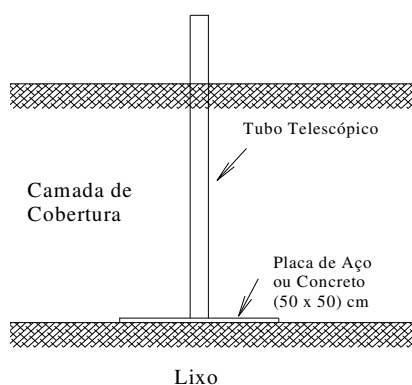
A leitura é realizada por um sensor, que é inserido dentro do tubo. O sensor é composto por rodas-guia, cabo e caixa de leitura. A primeira é responsável pela movimentação da sonda. O segundo pela medição da profundidade. O último pelo armazenamento dos dados obtidos em campo.

Os deslocamentos laterais são obtidos a partir das leituras de duas medidas: o ângulo que o sensor está com a vertical e o caminho por ele percorrido a partir do ponto inicial.

### 3.3.2 Placas de recalque

As movimentações superficiais podem ser monitoradas em placas de recalque. Elas são instaladas em pequenas valas e, usualmente, são formadas por uma laje quadrada de 0,50 x 0,50m, feitas de concreto ou metal, acoplada a uma haste metálica de ferro galvanizado. Os medidores são instalados preferencialmente no contato entre a camada de cobertura final e os resíduos, para minimizar a interferência das constantes movimentações de terra que acontecem na superfície do aterro.

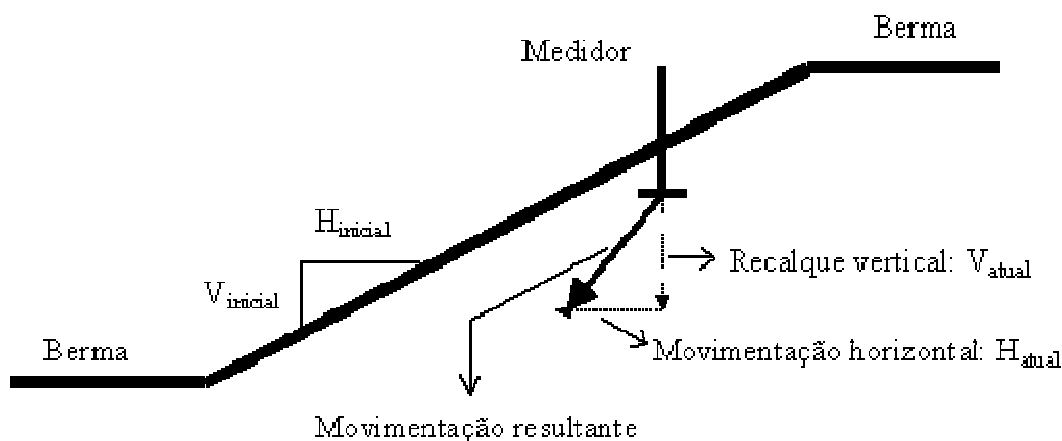
A haste metálica é levada até a superfície, sendo protegida por um tubo, que evita o contato direto e o atrito entre ela e o solo. As placas acompanham o movimento da massa de resíduos, sendo o seu deslocamento obtido pela diferença das cotas e posição do primeiro registro e do que se está analisando. As Figuras 3.5 e 3.6 mostram o desenho esquemático das placas de recalque.



**Figura 3.5** – Desenho esquemático da placa de recalque

**Figura 3.6** – Placa de recalque no aterro de Belo Horizonte

As placas de recalque podem ser instaladas nos taludes ou nas bermas dos alteamentos. A Figura 3.7 mostra o posicionamento genérico de um medidor, bem como, o vetor que indica a sua movimentação resultante. Em um padrão de movimentação esperado, os recalques verticais são predominantes para baixo e a movimentação horizontal à esquerda.



**Figura 3.7** – Esquema da movimentação dos medidores de recalque

### **3.4 Propriedades dos resíduos sólidos urbanos**

#### **3.4.1 Métodos de obtenção de parâmetros de compressibilidade**

A obtenção de parâmetros de compressibilidade para a concepção de projeto de aterros sanitários é extremamente importante. Além de possibilitar a previsão da vida útil do aterro sanitário, o seu conhecimento permite avaliar continuamente as condições de estabilidade dos taludes. Esses parâmetros estão em constante mudança, sendo necessária tanto a sua obtenção, como acompanhamento de suas características pelo monitoramento já descrito.

A obtenção desses parâmetros pode ser feita a partir de quatro tipos de análise: ensaios de laboratório e de campo, monitoramento de aterros e retroanálises. As duas primeiras têm grandes limitações, pois consideram apenas os recalques mecânicos, não sendo possível a contabilização da parcela ocorrida devido aos fatores biológicos. Isso ocorre porque não estão presentes as condições ideais (físico-químicas e biológicas) além de um tempo mais longo, superior aos necessários para se completar os ensaios (Grisolia e Napoleoni, 1996).

Um ensaio laboratorial comum é o adensamento oedométrico ou de compressão confinada. Ele consiste na compressão de uma porção de RSU, posicionada em uma caixa fechada, sem permissão de deslocamentos laterais, conforme mostra a Figura 3.8. A drenagem dos líquidos é permitida e contabilizada por drenos nas laterais e na base da caixa. Inicialmente os resíduos são colocados dentro da câmara de compressão, sendo compactados com a densidade que se deseja fazer o ensaio. Depois disso, é aplicado o primeiro carregamento, sendo medida a variação da altura da amostra (que é transformada em índice de vazios) com o tempo decorrido da aplicação da carga. Após a estabilização das leituras é aplicado novo incremento de carregamento. Contudo, dessa vez, são anotados apenas os valores iniciais e finais de altura do estágio de compressão. Com isso, é gerada a curva índice de vazios x logaritmo da tensão

efetiva, sendo obtido o coeficiente de compressão primária ( $C_c$ ), que é a inclinação da reta virgem desse gráfico.



**Figura 3.8** – Consolidômetro de grandes dimensões usado em ensaios de compressão confinada (Nascimento *et. al.*, 2007)

Além do adensamento primário, que ocorre em virtude da dissipação de poro-pressões e com o tempo, também existe o adensamento secundário. Ele consiste na deformação da matriz sólida, sob tensão efetiva constante. No gráfico do índice de vazios x logaritmo do tempo, obtido para cada estágio de carregamento, pode ser obtido o coeficiente de compressão secundária ( $C_\alpha$ ). Ele é representado pelo coeficiente angular da porção reta da curva considerada.

Esses coeficientes podem ser transformados nos símbolos  $C_c'$  e  $C_\alpha'$  por meio das Equações 3.1 e 3.2, nas quais  $e_0$  representa o índice de vazios inicial da amostra. Simões (2000) apresenta valores típicos de  $C_c$ ,  $C_\alpha$ ,  $C_c'$  e  $C_\alpha'$  para RSU, ilustrados na Tabela 3.1.

$$C_c' = \frac{C_c}{(1 + e_0)} \quad (3.1)$$

$$C_\alpha' = \frac{C_\alpha}{(1 + e_0)} \quad (3.2)$$

**Tabela 3.1 – Valores típicos de  $C_c$  e  $C_{\alpha}$  (Simões, 2000)**

Referência	Obtenção	$C_c$	Observações
Sowers (1973)	Laboratório e Campo	$C_c = 0.03 e_o$	Resíduos com baixo teor de matéria orgânica
		$C_c = 0.55 e_o$	Resíduos com alto teor de matéria orgânica
		$C_{\alpha} = 0.03 e_o$	Para condições desfavoráveis à decomposição
		$C_{\alpha} = 0.09 e_o$	Para condições favoráveis à decomposição
Rao e outros (1977)	Laboratório e Campo	$0.16 < C'_c < 0.24$ $0.012 < C'_{\alpha} < 0.046$	
Cartier e Baldit (1983)	Campo	$0.54 < C_c < 0.69$ $0.30 < C_{\alpha} < 0.40$	Para $e_o$ entre 0.9 e 1.35 (baseado em índices físicos do resíduo)
		$0.84 < C_c < 0.9$ $0.50 < C_{\alpha} < 0.55$	Para $e_o = 2$ (condições de compactação forte)
Landva e Clark (1990)	Laboratório	$0.17 < C'_c < 0.35$	
Deutsch e outros (1994)	Campo	$C'_c = 0.30$	Análise estatística de dados de monitoramento
Tang e outros (1994)	Campo	$0.16 < C'_c < 0.32$	
Gabr e Valero (1995)	Laboratório	$0.4 < C_c < 0.9$ $0.009 < C_{\alpha} < 0.03$	Resíduo velho com baixo teor de matéria orgânica e $e_o$ entre 1.0 e 3.0
Wall e Zeiss (1995)	Laboratório	$0.21 < C'_c < 0.25$ $0.033 < C'_{\alpha} < 0.056$	
Chen e Lee (1996) e Chen e Chou (1998)	Laboratório	$0.006 < C_{\alpha} < 0.02$	
Carvalho (1999)	Laboratório	$0.17 < C'_c < 0.23$ $0.011 < C'_{\alpha} < 0.016$	

O ensaio oedométrico também pode ser útil, quando aplicado com descarregamento e recarregamento. A partir dele, podem ser obtidos os parâmetros  $\lambda$  e  $\kappa$ . O primeiro é idêntico ao valor de  $C_c$  (a nomenclatura varia de acordo com a literatura). O segundo corresponde à inclinação da porção identificada pelo descarregamento da estrutura, no gráfico índice de vazios x logaritmo de tensão efetiva. Isso é usado em modelos elasto-plásticos, que descrevem o comportamento dos solos e de RSU.

Para a obtenção de parâmetros que permitem a avaliação elástica bidimensional de recalques (Módulo de Elasticidade – E e coeficiente de Poisson,  $\nu$ ) podem ser usados ensaios triaxiais drenados. Inicialmente, é feito o adensamento isotrópico, anterior à aplicação da tensão desviadora. A amostra de RSU é colocada em uma câmara de compressão, que têm tamanho limitado, o que torna seus resultados vulneráveis à incertezas. A amostra pode ter compostos

muito diferentes da constituição real dos RSU. Quanto maiores forem as câmaras de compressão usadas nesses ensaios, menores serão tais vulnerabilidades. König e Jessberger (1997) relatam dimensões de 1 metro de diâmetro do equipamento utilizado. No Brasil, são comuns câmaras de tamanho menor, como as de 200 x 400 mm, usada por Nascimento (2007) e por Carvalho (1999).

O ensaio de prova de carga com descarregamento é uma opção para substituir o ensaio de adensamento. Realizado em campo, ele consiste, em sua fase inicial, na colocação de placas na superfície dos RSU, sendo aplicadas cargas sobre elas, durante certo intervalo de tempo, com leituras periódicas. Depois disso, é feito o descarregamento da placa, anotando-se os novos recalques medidos. Esses processos de descarregamento e recarregamento podem ser repetidos por várias vezes. Jucá *et al.* (1998) realizaram quatro ensaios de placa, no aterro Muribeca, na cidade de Recife, sendo três sobre a camada de cobertura e um diretamente sobre os resíduos. Foi usada a formulação de método dos elementos finitos, com o programa Plaxis, para comparar os resultados obtidos nas formulações matemáticas e nas obtidas no campo. Foram usados os módulos de elasticidade obtidos no campo e o modelo constitutivo elástico perfeitamente plástico, com critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Verificaram-se bons resultados no primeiro ciclo de carga e descarga em alguns ensaios. Tal tendência não foi observada nos demais ciclos de carregamento e descarregamento, por limitações do modelo adotado. Colocou-se como fator limitante do ensaio a dificuldade de leitura em meios estratificados, na junção dos materiais de cobertura e resíduos. Os autores também ressaltaram a importância do uso da formulação do método dos elementos finitos e a possibilidade de se realizar pesquisas similares, usando-se parâmetros de RSU obtidos em laboratório. Landva e Clark (1990) chamam a atenção para os ensaios de placa. Eles recomendam o uso de uma prova de carga lenta sobre placa de dimensões maiores, da ordem de 1m, em função da deformabilidade e da heterogeneidade do lixo, além da pequena zona de influência das placas, que atingem, muitas vezes, apenas a parte superior da camada de RSU.

Entende-se por retroanálise, a obtenção de parâmetros de resistência ou de deformabilidade, a partir da reprodução de condições que ocorreram em campo. A ocorrência de escorregamento de taludes é ideal para a obtenção de parâmetros de resistência, uma vez que o fator de segurança no momento da ruptura é unitário. Benvenuto e Cunha (1991) reproduziram a situação onde ocorreu o escorregamento do Aterro Bandeirantes, em São Paulo, no dia 24 de junho de 1991. As conclusões foram que ocorreu a ruptura devido ao alto nível de líquidos no interior do maciço, à geometria das bermas superiores (espessuras de até 10 metros e inclinação de 22<sup>o</sup>) e à alta pluviosidade ocorrida nos dois dias anteriores à queda. Ela teve



como metodologia de trabalho o levantamento de dados existentes e disponíveis (topográficos, pluviometria, fotografias aéreas, inspeções de superfície, dentre outras), a reconstituição da geometria anterior à queda, a formulação de um modelo de ruptura e da análise da geometria do escorregamento e, a análise de fatores influentes na estabilidade. Foi atingida uma área de 45000 m<sup>2</sup> e o volume escorregado foi de 65000 m<sup>3</sup>, resultando em gastos elevados, mau cheiro nas adjacências, contaminação de corpos d'água superficiais à jusante do aterro de e à morte de um operador soterrado. Os parâmetros de resistência encontrados foram de 13<sup>0</sup> para o ângulo de atrito e de 22 kPa para a coesão. Esses valores se tornaram comuns no cálculo da estabilidade de taludes dos aterros sanitários projetados desde então.

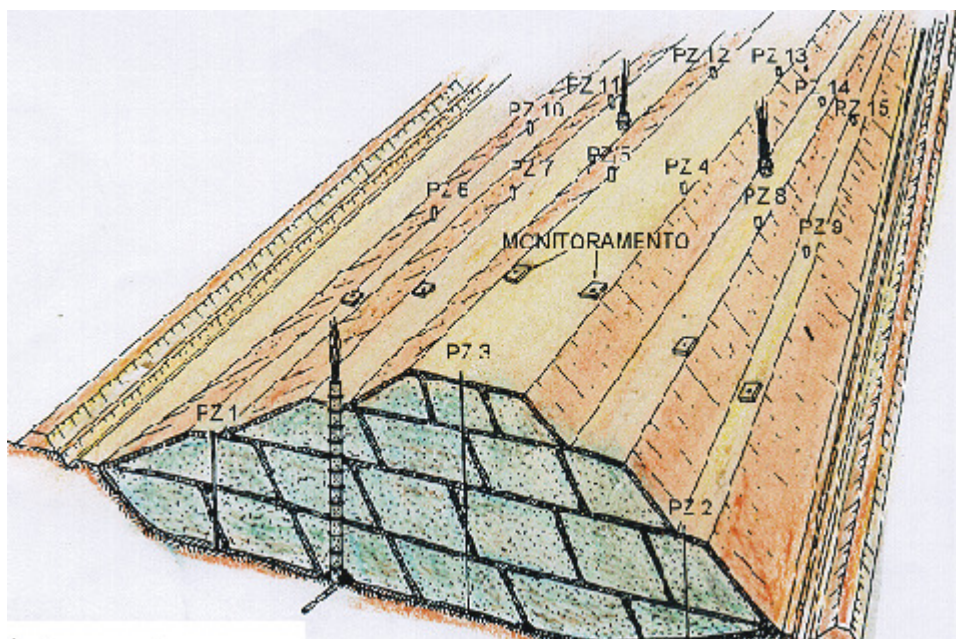
### **3.5 Propriedades mecânicas e biológicas dos RSU**

Os resíduos sólidos urbanos, bem como os solos, são meios multifásicos. Sua fase sólida é bastante diferenciada, sendo composta por uma série de materiais distintos, como plásticos, metais, entulhos, vidros, madeiras, têxteis, orgânicos, etc. Simões (2000) separa a fase sólida dos RSU em três grandes grupos:

- Elementos inertes estáveis (metais, vidro, entulho): apresentam comportamento similar aos materiais geotécnicos convencionais;
- Elementos muito deformáveis (plásticos, papéis e têxteis): possuem comportamento anisotrópico;
- Elementos biodegradáveis: principais responsáveis pela redução do volume total, pela transformação da fase sólida, em fases líquida e gasosa. Esse fato é o que mais os diferencia os RSU dos materiais geotécnicos.

A fase líquida é composta pela água de infiltração, água de constituição dos componentes e a proveniente dos processos de biodegradação. Esses fluidos se movimentam no interior da matriz porosa, mudando o comportamento geomecânico das partículas sólidas. A porosidade efetiva dos componentes dos resíduos está diretamente associada à quantidade de líquidos que se pode armazenar na matriz dos RSU. Ela é entendida como a razão entre o volume de vazios interconectados pelo volume total da estrutura. Essa interconexão auxilia bastante a percolação dos líquidos no interior dos RSU. Quando se chega a um determinado teor de água dentro dos vazios, alcança-se a capacidade de campo dos RSU, que é entendida como o maior volume de água que se pode armazenar, antes de haver a percolação. Esse conceito pode ser usado para se avaliar o balanço hídrico dentro dos aterros sanitários e para avaliar o nível de líquidos, em função dos regimes de precipitação. Essa análise é apenas uma simplificação,

pois não se tem um maciço de RSU homogêneo. A construção do aterro é feita por pequenas células de resíduos, com uma camada de cobertura sobre elas, como se pode verificar na Figura 3.9. Essas camadas conduzem à descontinuidades dos fluxos de líquidos lixiviados, mudando um pouco a teoria usada para o cálculo do balanço hídrico. Essa forma de construção do aterro contribui para a segurança, uma vez que são gerados menores valores de poropressão e, conseqüentemente, elevada a resistência do maciço ao cisalhamento, pela menor redução da tensão efetiva.



**Figura 3.9** – Visões na cobertura intermediária dos RSU em aterros

O líquido lixiviado é formado pela junção das águas de infiltração e pela degradação de compostos que escoam pela massa de lixo aterrada, carregando materiais dissolvidos e suspensos. Eles representam uma fonte potencial de contaminação, mas podem contribuir para os processos de degradação da matéria orgânica.

O balanço hídrico anteriormente citado tem como parâmetros de entrada a precipitação, a umidade natural solo e dos RSU e como parâmetros de saída a evapotranspiração, os líquidos lixiviados e o escoamento superficial. A diferença entre essas parcelas dá origem à quantidade de líquidos armazenada no interior do maciço.

A fase gasosa é formada por gases oriundos da decomposição da matéria orgânica. Os valores de pressão no interior do aterro dependem da eficiência dos sistemas de coleta e/ou drenagem e podem influenciar na estabilidade do maciço.

A biodegradação é um processo de decomposição de materiais, sobretudo os de origem orgânica, pela ação de microrganismos. Eles usam os RSU como fonte de alimento por meio de reações de oxidação. Podem ocorrer dois tipos: aeróbia (com presença de oxigênio) e anaeróbia (ausência de oxigênio). A primeira acontece rapidamente e a última é a preponderante nos aterros sanitários, por ser um ambiente com baixa concentração de oxigênio.

A decomposição anaeróbia acontece em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A primeira está associada à quebra de moléculas maiores em menores, por ação enzimática, dando origem a compostos dissolvidos, como aminoácidos, monossacarídeos e ácidos graxos. O processo de quebra evolui até a última etapa, que é a mais longa e a determinante no processo de biodegradação (processo de transferência de massa sólida para outras fases).

Soler *et al.* (1995) calcularam o volume de vazios gerados no processo de biodegradação, em função da quantidade de metano produzida. Isso é bastante razoável, por ser esse o gás gerado com maior percentual de ocorrência na decomposição anaeróbia. Para tal, assume-se que a taxa de produção de gases obedece a um modelo cinético de primeira ordem, isto é, ela decai exponencialmente em função do tempo. Os autores consideraram a parcela de materiais biodegradáveis nos resíduos e a taxa de geração de metano dos RSU, variável em função do tempo.

Simões (2000) usa o mesmo raciocínio no desenvolvimento de seu modelo de previsão de recalques em aterros sanitários, mas separa cada fração constituinte dos RSU e a massa potencialmente biodegradável em cada uma delas. Depois, adota um modelo de decaimento exponencial, para representar a redução da massa que se pode degradar. Cada fração tem uma taxa de biodegradação a si associada. Depois disso, é feito o somatório das massas individuais, para se obter a massa total perdida pela decomposição dos RSU.

Manassero *et al.* (1996) enumeram alguns dos mecanismos responsáveis pelos recalques dos RSU nos aterros sanitários:

- Compressão mecânica resultante do rearranjo e da quebra de elementos sólidos devido ao peso próprio dos RSU e ao peso dos materiais de cobertura;
- Variação de volume causada pela migração de pequenas partículas para os vazios maiores (erosão e ravinamentos internos);

- Comportamento viscoso e fenômeno de adensamento envolvendo tanto o esqueleto sólido quanto as partículas individuais, ou seja, os componentes;
- Recalques causados pela biodegradação dos componentes orgânicos;
- Colapso dos componentes devido às mudanças físico-químicas tais como corrosão, oxidação e degradação dos componentes inorgânicos.

Grisolia e Napoleoni (1996) propõem uma curva de compressibilidade, exemplificada em cinco estágios:

- Estágio I – Recalque instantâneo, devido ao decaimento dos macroporos e à deformação dos constituintes altamente deformáveis;
- Estágio II – Recalque mecânico primário com compressão contínua;
- Estágio III – Deformação mecânica secundária (arraste de resíduos e decomposição inicial dos orgânicos);
- Estágio IV – Decomposição dos orgânicos;
- Estágio V – Deformação residual.

A classificação dos materiais componentes do RSU é fundamental para o entendimento dos recalques nos aterros sanitários. Os materiais altamente deformáveis tendo uma compressibilidade maior, recalcam com maior rapidez. Os elementos biodegradáveis são os principais responsáveis pelos recalques em longo prazo dos RSU, devido ao tempo que dura a decomposição da matéria orgânica.

Outros autores também fazem essa divisão dos recalques em estágios. Simões (2000) divide os recalques em duas parcelas: uma de origem mecânica e outra biológica. A primeira é caracterizada por um recalque imediato, causado pela redução da macroporosidade e pela drenagem de líquidos e gases, no instante da disposição, devido à ação de cargas aplicadas e, por uma componente de longo prazo, originada pela deformação lenta da estrutura dos resíduos. A segunda parcela se dá pelos processos de decomposição que ocorrem no interior do aterro, onde há transferência contínua de massa da fase sólida para as fases líquida e gasosa, ocasionando uma redução no volume dos resíduos.

Catapreta (2008) coloca em três momentos diferenciados essa questão:

- Compressão inicial: Recalque que ocorre diretamente quando uma carga externa é aplicada. É associada à compactação imediata dos espaços vazios e partículas devido à sobrecarga. Ela pode ser relacionada com a compressão elástica dos solos;
- Compressão primária: Ocorre devido à dissipação de poro-pressões dos espaços vazios. Pode ser descrita analogamente à Teoria de Terzaghi para o fenômeno de adensamento de solos;
- Compressão secundária: Ocorre pela decomposição biológica, ao peso do corpo do aterro, o arraste de partículas menores para os vãos maiores, às ações físico-químicas e ao decaimento bioquímico.

Conforme citado por Catapreta (2008), a degradação da matéria orgânica é colocada em alguns modelos, juntamente com a compressão secundária, sendo caracterizada por um coeficiente de compressibilidade secundária ( $C\alpha$ ). Outros modelos, como o de Soler *et al.* (1995), calculam a perda de volume na massa sólida a partir da quantidade de metano gerada no processo. A separação da deformação oriunda da biodegradação e da compressão mecânica secundária é interessante, uma vez que se pode ter um conhecimento melhor das parcelas distintas do RSU, permitindo uma acurácia um pouco maior.

Simões (2000) comenta ainda, que a magnitude dos recalques dos aterros sanitários é influenciada por diversos fatores:

- Composição dos resíduos e porcentagem de material biodegradável;
- Peso específico e índice de vazios iniciais dos resíduos;
- Dimensões do aterro;
- História de tensões, envolvendo todas as etapas de operação após o fechamento;
- Pré-tratamento dos resíduos;
- Nível e flutuação dos líquidos no interior da massa;
- Existência de sistemas de extração de gases;
- Fatores ambientais (teor de umidade, temperatura e gases).

### 3.5.1 Modelos unidimensionais

O primeiro modelo de previsão de recalques em aterros foi proposto por Sowers (1973), que adotou uma aproximação da mecânica dos solos convencional, para prever recalques em

resíduos. Depois dele, vários autores vêm tentando modelar o comportamento dos recalques dos RSU em aterros sanitários, segundo 4 grupos de modelos:

- Modelos de Adensamento: baseados nas expressões da teoria de Terzaghi, que geralmente são utilizadas para calcular os recalques primário e secundário;
- Reológico: o comportamento de compressão de resíduos é modelado com utilização de conceitos e parâmetros reológicos dos materiais;
- Biodegradação: modelos onde se considera a redução gradual de volume dos componentes orgânicos, com base na degradação biológica da matéria orgânica;
- Regressão: onde há a utilização de algumas funções matemáticas para calibrar os modelos, segundo os dados de campo (logarítmicas, exponenciais, hiperbólicas, dentre outras).

Por serem os resíduos materiais tão heterogêneos, que mudam as suas propriedades a todo instante, é extremamente complicado conceber um modelo ideal para todas as condições. Por isso, várias pesquisas vem sendo feitas, para se tentar chegar o mais próximo possível da realidade. Na Figura 3.10, Catapreta (2008) cita alguns modelos empregados para avaliação e previsão de recalques.

Modelo	Pesquisador
Modelo Reológico	Edil <i>et al.</i> (1990)
	Bleiker <i>et al.</i> (1995)
	Chen & Chou (1998)
Função logarítmica	Yen & Scanlon (1975)
Método da Regressão	Edil <i>et al.</i> (1990)
	Power creep law Punyanurthula (1995) Zhao <i>et al.</i> (2001)
	Função hiperbólica Ling <i>et al.</i> (1998)
Função bi-linear	Bjarngard & Edgers (1990)
	Jesseberg & Kockel (1991) Stulgis <i>et al.</i> (1995)
Função multilinear	Deutsch, Jr. <i>et al.</i> (1994)
Modelos baseados em expressões semelhantes às da teoria de adensamento de solos	Sowers (1973)
	Yen & Scanlon (1975)
	Rao <i>et al.</i> (1977)
	Oweis & Khera (1986)
	Bjarngard & Edgers (1990)
	Edil <i>et al.</i> (1990)
	Landva & Clark (1990)
	Morris & Woods (1990)
	Wall & Zeiss (1995)
	Deutsch, Jr. <i>et al.</i> (1994)
	Fasset <i>et al.</i> (1994)
	Boutwell & Fiore (1995)
	Stulgis <i>et al.</i> (1995)
Ourry & Page (2005)	
Gourc & Oliveir (2005)	
Modelo de Biodegradação	Wall & Zeiss (1992)
	Diaz <i>et al.</i> (1995) e Espinace <i>et al.</i> (1999)
	Park & Lee (1997/2002)
	Edgers <i>et al.</i> (1992)
	Simões (2000)
Marques <i>et al.</i> (2003)	

**Figura 3.10** - Modelos unidimensionais de recalques de aterros sanitários (Catapreta, 2008)

A maioria desses modelos não apresenta separadamente os mecanismos mecânicos e de biodegradação. O modelo reológico composto, descrito por Marques (2001) e o modelo de Simões (2000) apresentam uma evolução nesses aspectos, uma vez que reúnem três parcelas diferenciadas que dão origem aos recalques: compressão mecânica primária e secundária e compressão por degradação da matéria orgânica.

a) Modelo composto de Marques (2001)

A compressão primária ocorre pela parcela de deformações devido ao incremento das tensões verticais dos RSU e sua formulação segue o modelo de Sowers (1973) (Equação 3.3):

$$\varepsilon_p = C'_c \log\left(\frac{(\sigma_0 + \sigma)}{\sigma_0}\right) \quad (3.3),$$

Em que:  $\varepsilon_p$  - deformação instantânea;  $C'_c$  - coeficiente de compressão primária;  $\sigma_0$  - tensão vertical inicial;  $\Delta\sigma$  - incremento de tensão vertical.

A segunda parcela se refere aos fenômenos mecânicos dependentes do tempo. Sua formulação foi baseada e adaptada do modelo de Gibson e Lo (1961). Este mecanismo incorpora a parcela de deformações devidas ao processo de fluência do material sob ação do peso próprio e carregamentos externos (Equação 3.4).

$$\varepsilon_c = b\Delta\sigma(1 - e^{-ct'}) \quad (3.4),$$

Em que:  $\varepsilon_c$  : deformação devida ao creep;  $b$  - coeficiente de compressão secundária;  $\Delta\sigma$  - incremento de tensão vertical;  $c$  - taxa de compressão mecânica secundária;  $t'$  - tempo a partir da aplicação do carregamento.

A terceira parcela, que ocorre devido à degradação da matéria orgânica, tem sua formulação baseada nos estudo de Park e Lee (1997) (Equação 3.5).

$$\varepsilon_B = E_{DG}\left(1 - e^{-dt''}\right) \quad (3.5),$$

Em que:  $\varepsilon_B$  - deformação devida à biodegradação;  $E_{DG}$  - deformação máxima que pode ocorrer devido à biodegradação;  $d$  - Taxa de compressão biológica secundária;  $t''$  - tempo a partir da disposição dos resíduos.

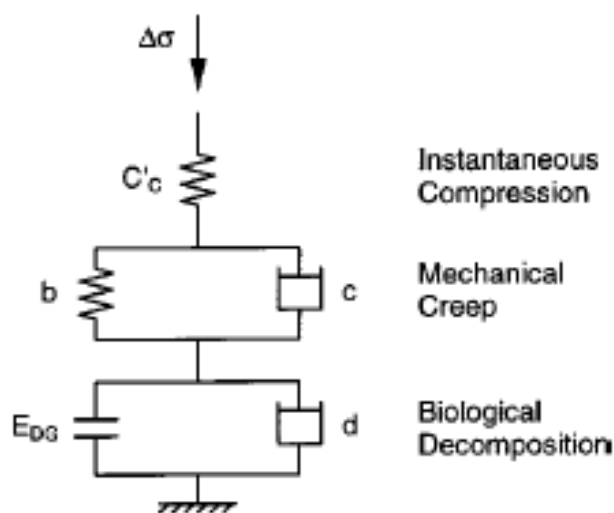
As deformações totais são obtidas pelo somatório das três parcelas. Esquemáticamente, esse modelo pode ser representado por três modelos reológicos distintos (Figura 3.12). O primeiro mecanismo é comparado a uma mola, que segue a Lei de Hooke, por representar um fenômeno elástico.

O segundo é associado a um elemento Kelvin, isto é, uma mola de constante elástica  $b$ , associada em paralelo com um amortecedor Newtoniano com coeficiente de viscosidade  $c$ . Fisicamente, representa um modelo visco-elástico. Após a aplicação de um incremento de tensão, que pode ser originado pelo peso próprio do resíduo ou de cargas aplicadas na superfície, a mola de constante  $b$  se comprime instantaneamente, de maneira análoga à



compressão primária. A compressão do elemento Kelvin é retardada pelo amortecedor, de maneira similar à compressão secundária sob tensão efetiva constante. A carga é, então, transferida progressivamente para a segunda mola, de constante  $b$ . Após um certo tempo, toda a tensão será suportada pelas duas molas.

O terceiro elemento é associado a um elemento de compressão finita com a constante representativa  $E_{DG}$  associado em paralelo com uma amortecedor com coeficiente de viscosidade  $d$ . Fisicamente, representa-se um elemento visco-plástico. O primeiro representa o máximo de deformações que se podem obter quando toda a matéria orgânica for decomposta. Como há uma deformação permanente inerente à perda de massa da estrutura, pode-se ilustrar por um modelo reológico plástico. A segunda parte se caracteriza por um comportamento viscoso, indicando como o tempo influi na biodegradação. Por ser uma exponencial negativa a fórmula que corresponde a esse mecanismo, sabe-se que a derivada é decrescente, o que induz uma taxa de deformação menor ao longo do tempo, levando à estabilização depois de certo tempo. Tal fato é bastante coerente, uma vez que há menor quantidade de matéria orgânica em função do tempo.



**Figura 3.11** – Modelo Reológico Compósito Marques (2003)

b) Modelo Acoplado Mecânico-Biológico de Simões (2000)

Simões (2000) também divide seu modelo em três partes: a mecânica de curto e longo prazo, além das deformações de origem biológica. A primeira é igual à porção elástica do modelo reológico compósito, substituindo  $C_c'$  por  $CR$ , embora tenham a mesma função. A componente mecânica devido ao comportamento viscoso dos resíduos é descrita pela Equação 3.6:

$$H_2 = H_0 \cdot C_\alpha \cdot \log\left(\frac{t_f}{t_i}\right) \quad (3.6)$$

Em que:  $H_2$  - recalque devido ao comportamento mecânico viscoso (m);  $h_0$  - altura inicial (m);  $t_f$  - tempo final (ano);  $t_i$  - tempo inicial (ano).

A biodegradação é modelada seguindo modelos com decaimento exponencial, separados em frações constituintes de biodegradabilidade distintas. A formulação matemática que rege tais relações é (Equação 3.7):

$$\Delta M_{ij}(t) = M_{ij0} * \left(1 - e^{-k_{ij}(t-t_0)}\right) \quad (3.7)$$

Em que:  $\Delta M_{ij}$  - variação da massa potencialmente biodegradável da fração constituinte  $i$  na camada  $j$ ;  $M_{ij0}$  - massa inicial potencialmente biodegradável da fração constituinte  $i$  na camada  $j$ ;  $k_{ij}$  - taxa de biodegradação da fração constituinte  $i$  na camada  $j$  (1/ano);  $t_0$  - tempo inicial (ano).

O modelo simula a sequencia construtiva do aterro. Com isso, é possível calcular a cada alteamento do aterro a massa degradada de cada fração constituinte em cada camada. Como nem toda a matéria das frações estabelecidas é biodegradável surge o conceito de biodegradabilidade potencial (BP), que é incorporado no modelo pela Equação 3.8:

$$M_{ij0} = BP * M_{ij} \quad (3.8)$$

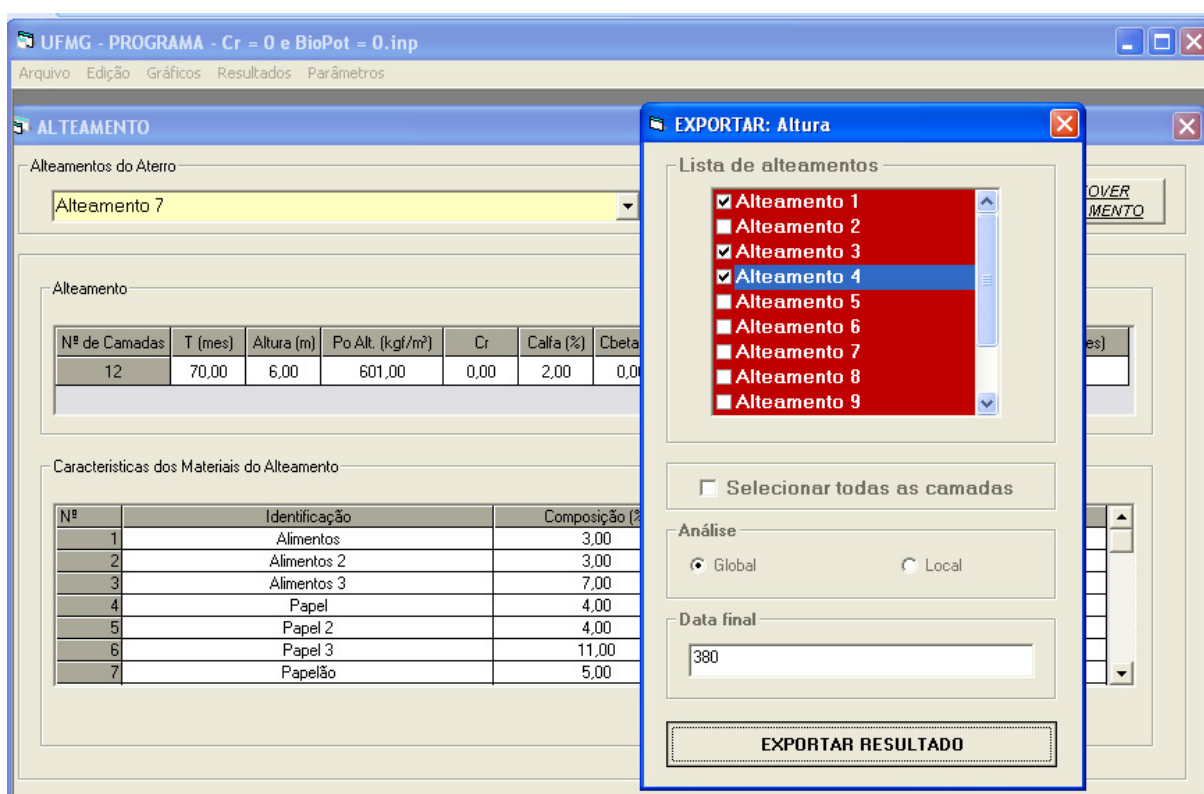
Em que:  $BP$  - biodegradabilidade potencial;  $M_{ijt}$  - massa total do material  $i$  da camada  $j$ ;  $M_{ij0}$  - massa inicial potencialmente biodegradável da fração constituinte  $i$  na camada  $j$ .

Podem ser inseridas várias frações constituintes, com velocidades diferentes de decomposição. O cálculo dos valores da taxa de biodegradação de cada fração constituinte depende do tempo associado à 90% da decomposição de toda a parcela biodegradável, que deve ser estabelecido como dado de entrada do modelo.

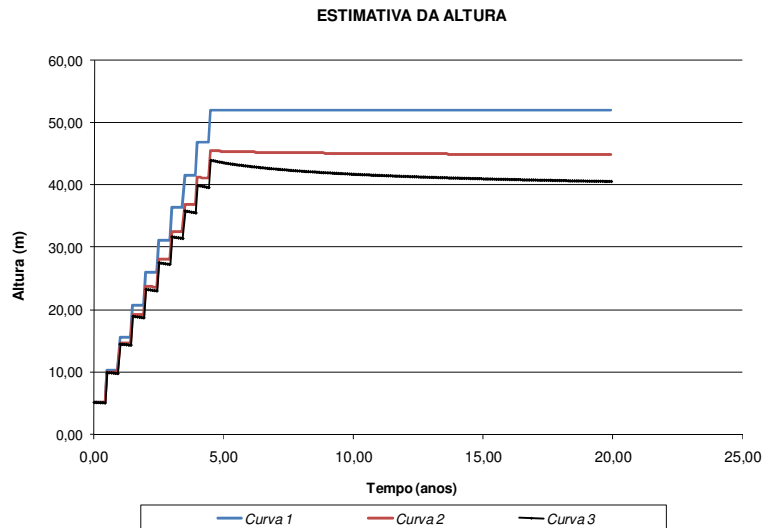
Simões & Lanes (2009) descrevem a implementação computacional do modelo apresentado por Simões (2000). O programa desenvolvido possui interface gráfica amigável e tem como dados de entrada:

- Sequencia construtiva: tempos de construção, alturas, pesos específicos de cada alteamento; espessura e densidade das camadas de cobertura intermediárias;
- Parâmetros gerais dos resíduos em cada alteamento: composição gravimétrica e taxas de biodegradação de cada fração constituinte; coeficientes de compressibilidade imediato e viscoso dos resíduos.

Os autores descreveram um exemplo genérico em seu trabalho, onde foi simulado um aterro com 10 alteamentos, cada um com 6 meses e 5 metros de espessura. O peso específico inicial usado foi de  $8 \text{ kN/m}^3$ . O valor de CR foi de 0,15 e o de  $C_a$  foi de 1,5%. Foram analisadas três situações distintas, sendo a primeira apenas devido à construção, a segunda considerando apenas os efeitos mecânicos e a terceira uma biodegradabilidade potencial de 40%. Foram obtidas deformações que variaram entre 13% e 22%. Notou-se também o aumento do peso específico em todas as ocasiões. As Figuras 3.12 e 3.13 mostram a evolução da altura do aterro com o tempo, bem como um exemplo da interface do programa.



**Figura 3.12** – Exemplo de Interface do programa de recalque unidimensional do modelo acoplado mecânico-biológico (Simões e Lanes, 2009)



**Figura 3.13** – Evolução das altura do aterro em função do tempo (Simões & Lanes, 2009)

Embora tenham incorporado aspectos importantes na modelagem de recalques de aterros em RSU, esses modelos ainda são incompletos, pois tratam da situação unidimensional, não incorporando aspectos importantes, como os deslocamentos horizontais. Por isso, é imprescindível tentar formular modelos bidimensionais de recalque, a fim de se entender de forma mais completa o fenômeno.

### **3.6 Análises de problemas tensão x deformação**

A abordagem mais tradicional para representação do comportamento dos materiais sólidos faz uso da Teoria da Elasticidade clássica, onde os gradientes de deslocamento infinitesimais resultam em rotações e deformações também infinitesimais. Pode-se definir como material elástico aquele que retorna à sua forma original depois de sofrer descarregamento. Pela definição de Cauchy, um material elástico depende apenas do estado de deformações que ele se encontra.

#### **3.6.1 Modelos lineares-elásticos**

Em 1660, Robert Hooke começou a desenvolver problemas relacionados à Teoria da Elasticidade, através da relação linear entre a tensão aplicada e a deformação obtida em uma mola. Desde então, vários problemas passaram a ser desenvolvidos e explicados por sua teoria. Um material linear elástico isotrópico poderia ter relacionadas suas tensões e deformações por meio de duas constantes diferenciadas. Uma das formas mais comuns de representar tais grandezas está apresentada nas equações 3.9 até 3.14:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{[\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})]}{E} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{[\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})]}{E} \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{[\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})]}{E} \quad (3.11)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{2G} \quad (3.12)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{2G} \quad (3.13)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{2G} \quad (3.14)$$

Em que:  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_{zz}$  - deformações normais nas direções x, y e z;  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  - tensões normais nas direções x, y e z;  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{xz}$ ,  $\gamma_{yz}$  - deformações angulares nos planos xy, xz e yz;  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ : tensões cisalhantes nos planos xy, xz e yz; E - módulo de elasticidade; G - módulo de elasticidade transversal ou cisalhante;  $\nu$  - coeficiente de Poisson.

Embora três constantes (E,  $\nu$ , G) estejam presentes nas definições acima, elas se relacionam através da Equação 3.15. Com isso, a premissa da definição da matriz constitutiva dos materiais, elásticos e fisicamente lineares com apenas dois valores desconhecidos fica verificada.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.15)$$

### 3.6.1.1 Estado Plano de Deformações (EPD)

O estado plano de deformações é uma idealização muito usada em obras geotécnicas, sobretudo em análises de barragens e túneis, desde que sejam respeitadas as seguintes premissas (Ibañez, 2003):

- Uma das dimensões do corpo é muito maior que as outras duas, permitindo que uma seção transversal qualquer possa ser considerada como “seção de simetria”, apresentando deformações nulas em seu plano normal;
- Os parâmetros elásticos não variam ao longo da maior dimensão do corpo;
- O carregamento não varia ao longo da maior dimensão do corpo e tampouco apresenta componente nessa direção.

Pode-se considerar que algumas células de aterros sanitários atendem às três premissas e se pode simplificar as análises que seriam feitas em 3D, para um modelo 2D. Para tal, é considerada uma espessura unitária na maior dimensão.

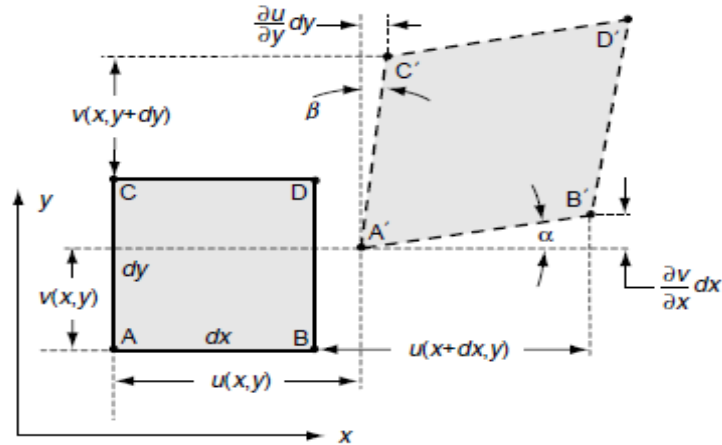
Pela aplicação da Lei de Hooke generalizada, chega-se à matriz constitutiva dos materiais elásticos lineares isotrópicos, que seguem as premissas do EPD (Equação 3.16).

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{vmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{vmatrix} \quad (3.16)$$

### 3.6.1.2 Relação Deformação x deslocamentos

Para a formulação do Método dos Elementos Finitos (MEF), é importante se conhecer não tão somente a matriz constitutiva que descreve o material, mas também as relações deformações x deslocamentos que os regem. Para um meio contínuo, cada ponto tem a si associado equações e variáveis diferenciadas. Contudo, as avaliações são feitas infinitesimalmente.

A Figura 3.15 ilustra um elemento plano infinitesimal. Ele pode sofrer processos de rotação, translação e cisalhamento. Nele, estão representadas as suas coordenadas cartesianas (x,y), bem como suas funções de deslocamento u(x,y) e v(x,y), horizontais e verticais, respectivamente. Supondo pequenos deslocamentos, podem ser obtidas as relações 3.17, 3.18 e 3.19.



**Figura 3.14** – Distorção angular provocada em um elemento plano (Sadd, 2000)

$$\varepsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x} \quad (3.17)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\delta v}{\delta y} \quad (3.18)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} \quad (3.19)$$

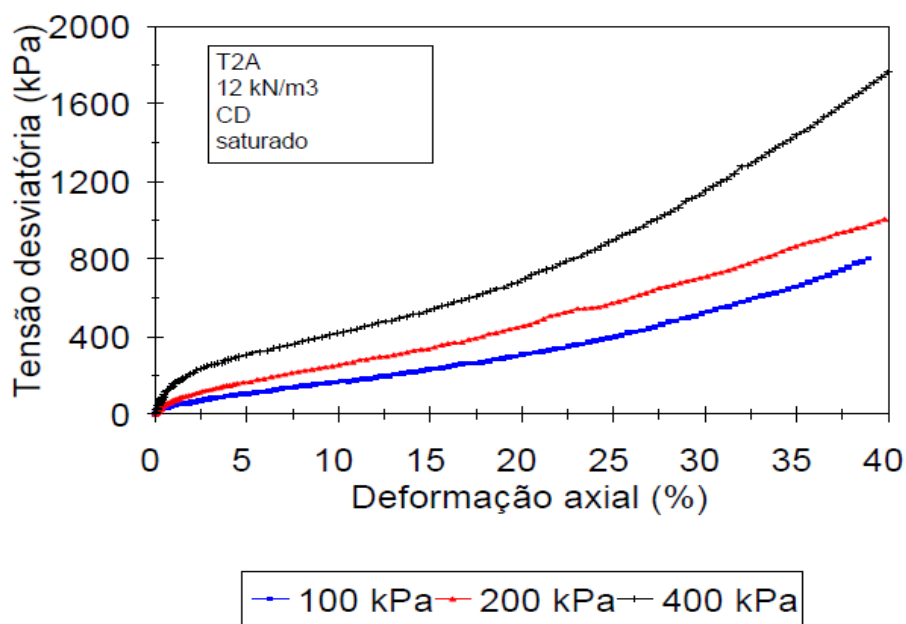
As relações mostradas valem para o regime de pequenos deslocamentos. Quando ocorrem grandes deslocamentos, a relação entre deformações e deslocamentos não é mais linear. Com isso, aparecem derivadas parciais de segunda ordem, que dependendo do problema, devem ser consideradas.

### 3.7 Características dos RSU observadas em ensaios triaxiais

Alguns mecanismos e estágios de desenvolvimento dos recalques em aterros sanitários foram descritos anteriormente. A seguir, serão introduzidos alguns fatores que tem influência no comportamento em condições bidimensionais.

#### 3.7.1 Influência da tensão de confinamento

Nos ensaios triaxiais são utilizadas diferentes tensões de confinamento. O comportamento apresentado pelos RSU envolvidos em tais processos é muito semelhante com o dos solos. Isto é, há aumento do módulo de elasticidade com o confinamento. Isso pode ser observado nos resultados de ensaios triaxiais apresentados por Marques (2001) (Figura 3.15).



**Figura 3.15** – Diagrama tensão desviadora x deformação axial (Marques, 2001)

Outra característica importante do comportamento de RSU em compressão, é que não há tensões de pico nos diagramas tensão x deformação. Com isso, pode-se concluir que o lixo não se rompe para os níveis de tensão e deformação que podem ser aplicados nos ensaios atuais.

### 3.7.2 Influência da idade

O envelhecimento do resíduo traz consigo um menor teor de matéria orgânica sobre a composição gravimétrica total. Contudo, isso ainda não é o suficiente para se estabelecer a influência da idade dos mesmos sobre os parâmetros elásticos.

Tomando-se por base a pesquisa de Nascimento (2007), não se percebe uma tendência clara de elevação ou de diminuição do módulo de elasticidade com o envelhecimento dos resíduos. O coeficiente de Poisson, calculado a partir do gráfico de deformação volumétrica x deformação axial ( $\epsilon_v$  x  $\epsilon_1$ ), conforme Equação 3.20, apresentou elevação de seus valores em função do envelhecimento dos resíduos.

$$\nu = 0,5 * \left( 1 - \frac{\epsilon_v}{\epsilon_1} \right) \tag{3.20}$$

Isso sugere que para maiores idades, os resíduos tenham menor deformação volumétrica, dada uma mesma deformação axial. Ou seja, maiores valores de  $\epsilon_2$  e  $\epsilon_3$ . Nascimento (2007) faz uma comparação entre resíduos recém-aterrados e com 4 anos de idade. Tenta-se justificar tal



tendência pelo comportamento viscoso dos RSU ser mais pronunciado com o passar do tempo. Ou seja, uma parcela adicional de recalques passa a existir para resíduos envelhecidos. As Tabelas 3.2 e 3.3 apresentam os valores do coeficiente de Poisson obtidos nas pesquisas citadas.

**Tabela 3.2** – Resultados de ensaios triaxiais para RSU com  $\gamma = 8\text{kN/m}^3$  (Nascimento, 2007)

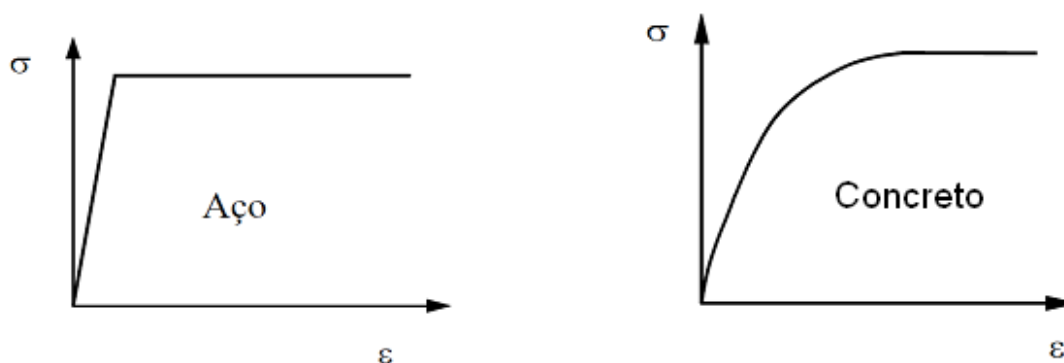
	$\sigma_3$ (kPa)			
Idade resíduo	49	101	202	
Novo	0,31	0,27	0,27	v
4 anos	0,32	0,30	0,30	

**Tabela 3.3** – Resultados de ensaios triaxiais de RSU com  $\gamma = 10\text{kN/m}^3$  (Nascimento, 2007)

	$\sigma_3$ (kPa)			
Idade resíduo	49	101	202	
Novo	0,28	0,28	0,30	v
4 anos	0,32	0,30	0,30	

### 3.8 Modelos fisicamente não-lineares

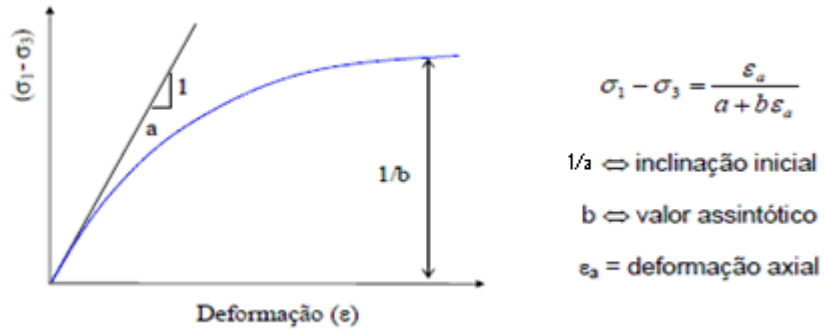
Materiais fisicamente não-lineares são aqueles que não obedecem à Lei de Hooke. Eles são descritos por formas mais complexas de matrizes constitutivas dos materiais. A Figura 3.16 apresenta dois materiais que têm essas características.



**Figura 3.16** – Materiais fisicamente não-lineares (Lourenço, 1999)

#### 3.8.1 Modelo hiperbólico

O modelo hiperbólico é um modelo elástico e fisicamente não-linear. Ele pode ser usado para representar as curvas tensão x deformação de vários tipos de solos, desde argilas até pedregulhos. Ele assume curvas que podem ser aproximadas por hipérbolas, para determinada tensão confinante ( $\sigma_3$ ). A Figura 3.17 exemplifica o modelo, sendo ilustrada também a expressão que rege tal modelo.



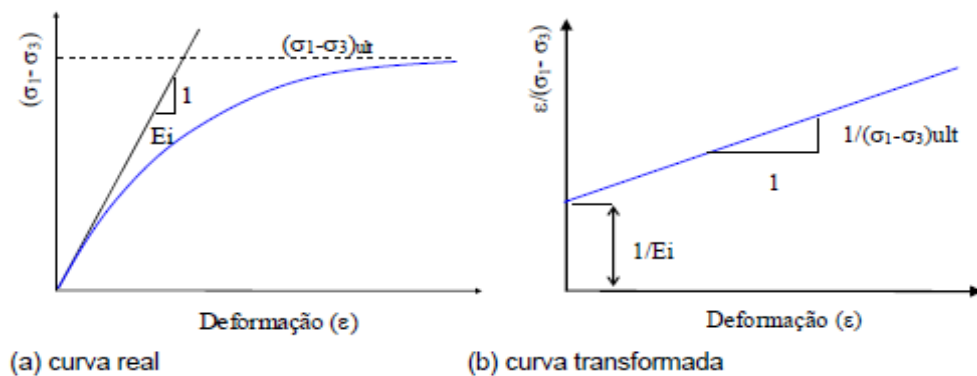
**Figura 3.17** – Modelo hiperbólico (Duncan e Chang, 1970)

Pela Figura 3.18, percebe-se que a inclinação inicial da curva é dada por  $1/a$  e a ordenada da assíntota tem o valor de  $1/b$ . Essas duas grandezas são substituídas por  $E_i$  e  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ . Desenvolvendo-se a relação escrita na Figura 3.18 e, promovendo a sua linearização, chega-se a Equação 3.21:

$$\frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (3.21)$$

Em que:  $E_i$  - módulo de elasticidade inicial para certa tensão confinante;  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  - valor assintótico da função que define o modelo hiperbólico.

Ao se construir o gráfico  $\varepsilon/(\sigma_1 - \sigma_3) \times \varepsilon$ , pode-se obter os valores do módulo de elasticidade inicial e a assíntota do modelo hiperbólico, a partir do inverso dos coeficientes lineares e angulares da reta da curva transformada (linearizada) (Figura 3.18).



**Figura 3.18** – Gráfico do modelo hiperbólico linearizado (Duncan e Chang, 1970)

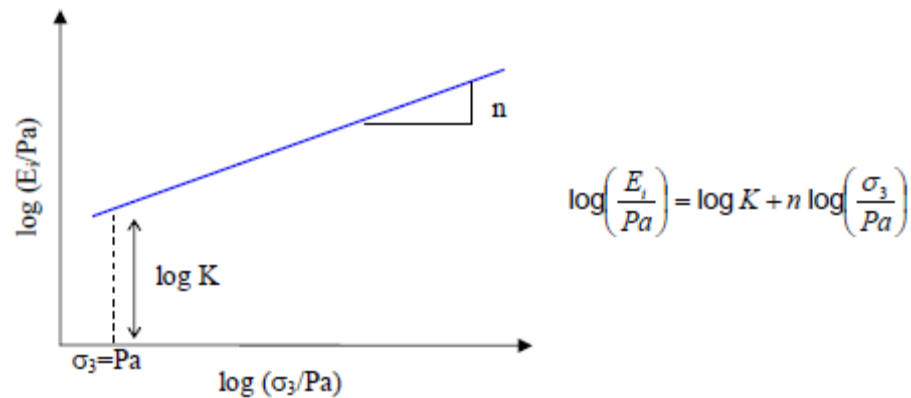
### 3.8.1.1 Expressão de Janbu

Janbu (1963) apresentou uma equação que relaciona o módulo de elasticidade com a tensão de confinamento (Equação 3.22).

$$E_i = K.Pa.\left(\frac{\sigma_3}{Pa}\right)^n \quad (3.22)$$

Em que: K, n - parâmetros adimensionais; Pa - pressão atmosférica

Essas grandezas podem ser obtidas a partir do gráfico  $\log(E_i/Pa)$  x  $\log(\sigma_3/Pa)$ . A Figura 3.19 ilustra o gráfico esquemático e a Equação 3.22 linearizada.



**Figura 3.19** – Representação da equação de Janbu (Duncan e Chang, 1970)

Quando o valor de  $\sigma_3$  é igual à pressão atmosférica, o valor das ordenadas da reta interpolada será igual ao  $\log(K)$ . O coeficiente angular da reta corresponde ao valor de  $n$ . Os dados podem ser provenientes de um ensaio triaxial, associando-se a tensão de confinamento com seu respectivo módulo de Elasticidade Inicial.

### 3.8.1.2 Valores relacionados à ruptura

Três dos parâmetros do modelo hiperbólico são oriundos diretamente da ruptura. Dois deles são a coesão ( $c$ ) e o ângulo de atrito ( $\phi$ ). Eles são obtidos quando se traça a envoltória de ruptura no gráfico  $\tau$  x  $\sigma$ , sendo representados pelos coeficientes lineares e angulares desse gráfico. O outro parâmetro com relevância é o  $R_f$ , definido pela Equação 3.23:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = R_f (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \quad (3.23)$$

Em que:  $R_f$  - razão de ruptura;  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  - tensão desviadora de ruptura fornecida pelo critério de Mohr-Coulomb.

Os valores comumente encontrados para  $R_f$  em solos variam entre 0,70 e 0,95. Caso  $R_f$  seja nulo, significa a adoção de um modelo elástico-linear, sem ruptura. Valores unitários significam valores iguais entre a ruptura e a assíntota do modelo.

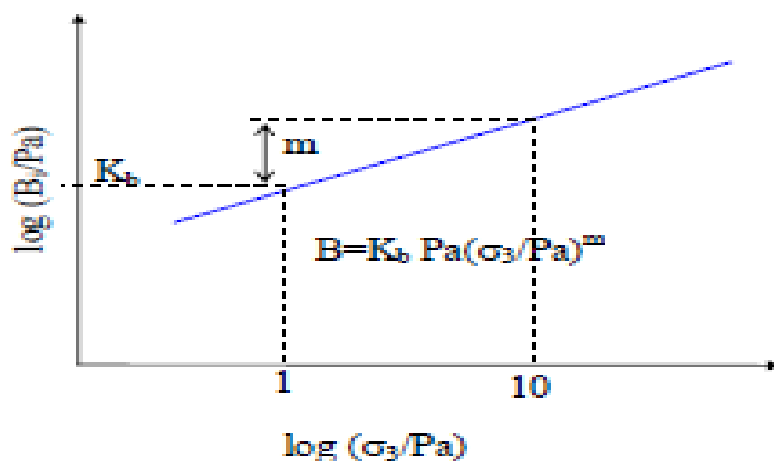
### 3.8.1.3 Módulo de variação volumétrica (B)

O módulo de variação volumétrica é considerado independente dos valores da tensão desviadora, mas cresce com a tensão confinante. A expressão que rege a relação entre B e  $\sigma_3$  é dada pela Equação 3.24:

$$B = K_B \cdot P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (3.24)$$

Em que: B - módulo de variação volumétrica;  $K_B$ , m - parâmetros adimensionais;  $P_a$  - pressão atmosférica.

A obtenção dos parâmetros adimensionais  $K_B$ , m pode ser feita a partir dos gráficos  $\log (B/P_a)$  x  $\log (\sigma_3/P_a)$ , conforme ilustra a Figura 3.20.



**Figura 3.20** – Valores do módulo de variação volumétrica em função do confinamento (Duncan e Chang, 1970)

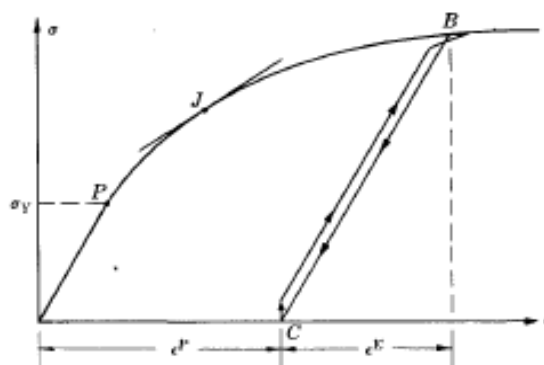
Quando o valor de  $\sigma_3$  é igual à pressão atmosférica, o valor das ordenadas da reta interpolada será igual à  $\log (K_B)$ . O coeficiente angular da reta corresponde ao valor de m.

A vantagem principal desse modelo hiperbólico, é que ele pode ser usado apenas com os resultados de ensaios triaxiais, uma vez que todos os seus parâmetros podem ser obtidos diretamente dele.

## 3.8.2 Modelos elasto-plásticos

Modelos plásticos representam modelos fisicamente não-lineares e são a base de muitos modelos constitutivos que descrevem o comportamento dos solos e de outros materiais. Uma característica importante que define os modelos plásticos é a deformação permanente, que

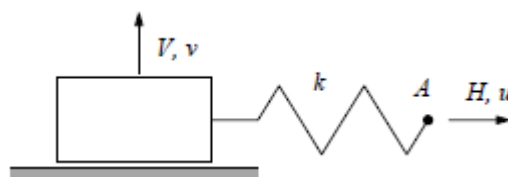
ocorre depois que um corpo é carregado com uma tensão acima da de escoamento. A Figura 3.21 ilustra um diagrama típico de materiais que seguem leis plásticas.



**Figura 3.21** – Diagrama tensão x deformação de um material plástico (Mase, 1970)

Pela análise da Figura 3.21, verifica-se que o diagrama tensão x deformação tem uma porção reta (elástica) e uma porção curva (plástica). O ponto P divide os dois segmentos e sua ordenada corresponde ao limite de proporcionalidade entre tensões e deformações. No exemplo presente, carrega-se o material até atingir o ponto B. Quando se retira o carregamento, a estrutura volta por uma linha paralela à porção linear do gráfico, atingindo o ponto C. Além disso, causa-se uma deformação residual permanente, representada por  $\epsilon^P$ . Quando se realiza um segundo carregamento, a tensão de escoamento passa a ser representada pelo ponto B. Essa característica é chamada de endurecimento e, representa o aumento da porção elástica.

Entende-se por superfície de plastificação aquela que separa os estados de tensão que conduzem à deformações elásticas e plásticas. Caso o estado de tensão do material seja interno à superfície, serão observadas apenas deformações elásticas, caso o estado esteja sobre a superfície, serão observadas deformações residuais. Essa superfície pode ser representada por funções de plastificação, que podem seguir vários critérios: Mohr-Coulomb, Tresca, Von Mises, dentre outros. Lourenço (1999) apresenta a Figura 3.22 para descrever a plastificação.



**Figura 3.22** – Sistema massa-mola para representação de modelo elasto-plástico (Lourenço, 1999)

Ao se aplicar uma força sobre o sistema massa-mola, haverá a deformação elástica da mola e, em sequencia, depois de vencido o atrito do bloco com o solo, ele se movimentará. Contudo, depois de cessada a força, ocorrerá uma deformação permanente, devido ao deslizamento dos objetos, caracterizando um comportamento plástico. Imaginando que seja possível uma movimentação vertical do bloco, só haverá o deslizamento, segundo o critério de Coulomb, se a tensão de cisalhamento aplicada for superior à tensão normal aplicada no mesmo corpo, multiplicada por um ângulo de atrito, somado a uma dada coesão. Essa expressão é representada pela Equação 3.25:

$$\tau - \sigma \cdot \tan \phi + c = 0 \quad (3.25)$$

Em que:  $\tau$  - tensão cisalhante;  $\sigma$  - tensão normal;  $\phi$  - ângulo de atrito;  $c$  - coesão do solo.

Imaginando-se um estado de tensões bidimensional, pode-se desenhar o círculo de Mohr, que representa os estados de tensão de um elemento plano, para quaisquer eixos. Substituindo-se as expressões obtidas no círculo de Mohr na Equação 3.25, dá-se origem à Equação 3.26.

$$\frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1) + \frac{1}{2}(\sigma_3 + \sigma_1) \sin \phi - c \cdot \cos \phi = 0 \quad (3.26)$$

Essa expressão é definida como a função de plastificação de Coulomb, representando os estados de tensão em que ocorre a plastificação. Estados de tensão, que deixam a expressão negativa, indicam comportamento unicamente elástico. Pela lei de escoamento, define-se que não basta que o ponto representativo da tensão esteja sob a superfície de plastificação, mas, que permaneça um tempo curto sob ela.

A taxa de variação das deformações plásticas pode ser expressa na Equação 3.27.

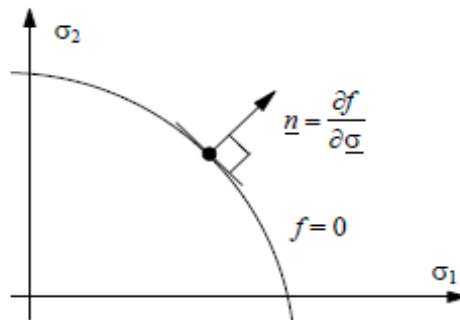
$$\frac{d\epsilon^p}{dt} = \lambda \cdot \underline{m} \quad (3.27)$$

Em que:  $d\epsilon^p/dt$  - taxa de variação das deformações plásticas;  $\lambda$  - magnitude do escoamento plástico;  $\underline{m}$ : direção do escoamento plástico.

Admitindo-se que a função de plastificação depende unicamente do estado de tensões, pode-se definir o vetor  $n$ , que representa o vetor perpendicular à função de plastificação no ponto indicado pelas tensões. A fórmula que o define, bem como a figura ilustrativa, são mostradas na Equação 3.28 e na Figura 3.23:

$$\underline{n} = \frac{\partial f}{\partial \underline{\sigma}} \quad (3.28)$$

Em que:  $\underline{n}$  - vetor gradiente da função de plastificação no ponto correspondente aos estados de tensão do corpo;  $\underline{\sigma}$  - tensor de tensões;  $f$  - função de cedência.



**Figura 3.23** – Representação do vetor gradiente da função de plastificação (Lourenço, 1999)

Quando a direção do escoamento plástico coincide com a do gradiente da função plastificação, ou seja, quando o vetor  $\underline{m}$  é ortogonal à superfície de plastificação e paralelo à  $\underline{n}$ , é caracterizada a plasticidade associada. Isso significa que no diagrama  $p \times q$ , qualquer alteração nas tensões normais médias ( $p$ ), há alteração unicamente na deformação volumétrica e, uma mudança no valor das tensões desviadoras ( $q$ ), implica unicamente em distorções angulares. Esse tipo de plasticidade descreve com propriedade o comportamento dos metais.

Quando não ocorre a ortogonalidade já descrita, é definida a plasticidade não-associada. Ela é útil quando se descrevem os comportamentos de solos, concreto e rochas (Lourenço, 1999). O autor também coloca que existe um conjunto importante de leis de escoamento não-associado, que cobre quase todas as aplicações. Para tal, existe uma função  $g$ , denominada função potencial plástico, tal que:

$$\underline{m} = \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \quad (3.29)$$

A função  $g$  é designada por potencial plástico e, de acordo com a Equação 3.29, a direção do escoamento plástico é agora ortogonal à superfície definida pela equação  $g = 0$ .

A função de plastificação não é dependente unicamente do estado de tensões, mas também do parâmetro de endurecimento ( $\kappa$ ). Ele é um escalar, que depende da história de tensões do material. Com isso, pode-se concluir que a relação unívoca entre tensão  $\times$  deformação não mais ocorre, como nos modelos elásticos. Isso pode ser visualizado na Figura 3.21. Pode-se

ter uma tensão igual à  $P$  aplicada sobre o material, gerando deformações diferenciadas do primeiro carregamento.

Para se representar um modelo constitutivo elasto-plástico, torna-se necessário apresentar a função de plastificação à qual ele está representado, a função potencial plástico, que pode ser igual à anterior, em caso de plasticidade associada, e a lei de endurecimento que descreve o material.

Um modelo muito usado na mecânica dos solos e recentemente introduzido no desenvolvimento de algumas pesquisas relativas ao comportamento dos RSU é o Modelo Cam-Clay. Trata-se de um modelo constitutivo elasto-plástico, que representa o comportamento das argilas. Ele foi desenvolvido tendo três premissas básicas: representa solos normalmente adensados, com plasticidade associada e sem dilatância. É um modelo que depende de seis parâmetros, que podem ser obtidos a partir de ensaios triaxiais e oedométricos com descarregamento.

### **3.9 Estudos recentes de modelos bidimensionais e tridimensionais**

Nos últimos anos, alguns autores começaram a estudar com mais detalhe modelos bidimensionais e tridimensionais para a avaliação de recalques em RSU, tais como McDougall (2007) e Machado *et al.* (2008).

#### **3.9.1 Modelo proposto por Machado *et al.* (2008)**

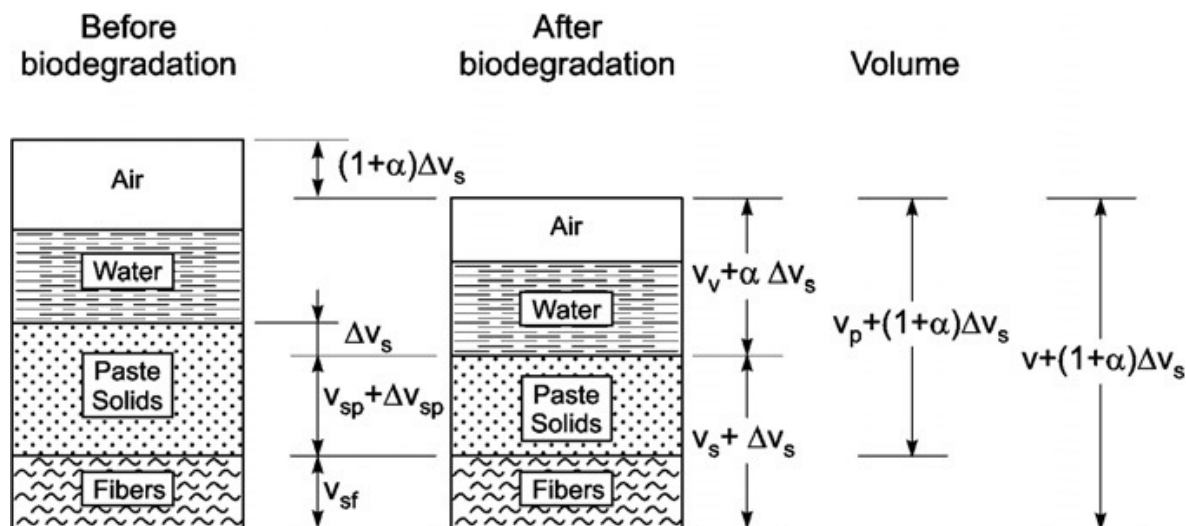
Trata-se de um modelo constitutivo tridimensional de recalques, onde são incorporados aspectos importantes, como a mudança do peso específico da massa sólida, a proporção dos materiais fibrosos e relação aos pastosos e os modelos constitutivos das fibras e das pastas, dentre outros. O modelo é descrito sob três premissas básicas:

- O comportamento dos RSU é controlado por dois tipos de materiais: os fibrosos, compostos basicamente por plásticos e outros não-fibrosos, denominados por pasta (madeira, matéria orgânica, vidro, dentre outros). Esse modelo considera um modelo constitutivo para cada tipo de componente;
- A tensão desviadora,  $q$ , é suportada em parte pelas fibras e em parte, pela pasta. A tensão normal média,  $p$ , é assumida como sendo a mesma para ambos. É assumido que no plano de cisalhamento, a presença das fibras somente contribuirá para a resistência ao cisalhamento, não afetando na tensão normal;



- As deformações são relacionadas com as fibras e as pastas. O índice de vazios é somente atribuído à pasta. As deformações volumétricas dos materiais fibrosos são desprezíveis, sendo controladas pela compressão da pasta.

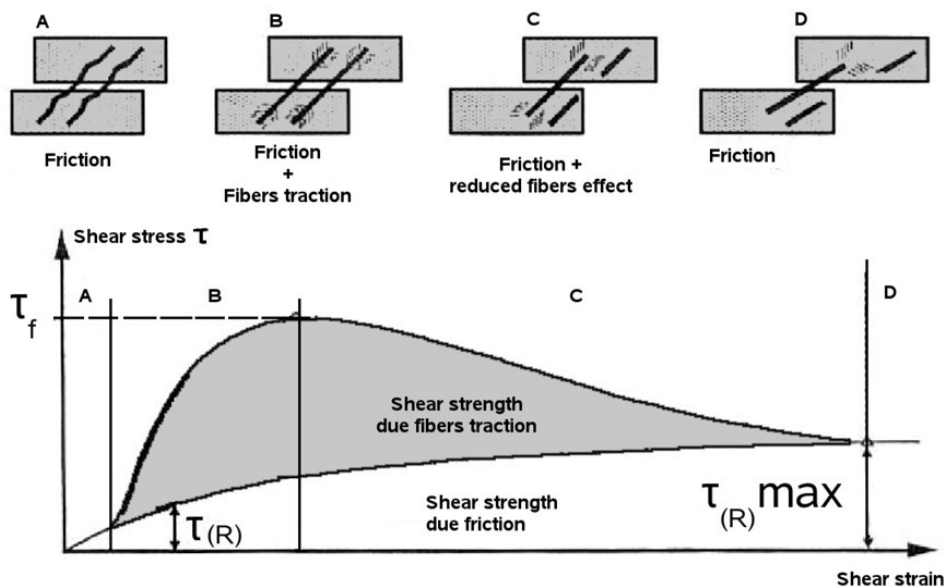
A Figura 3.24 ilustra os quatro componentes do resíduo: ar, água, fibras e pasta sólida.



**Figura 3.24** – Influência da perda de massa sobre o volume de resíduos (Machado *et al.*, 2008)

O comportamento distinto da pasta e das fibras justifica a adoção de modelos constitutivos diferenciados para cada uma delas. Para os primeiros, é adotado um modelo elastoplástico, sem endurecimento. Para a pasta, foi adotado um modelo elastoplástico, com plasticidade não associada e endurecimento.

O comportamento das fibras influencia no comportamento mecânico dos RSU, principalmente na resistência ao cisalhamento dos solos. Machado *et al.* (2008) coloca que a coesão do RSU começa a ser afetada pelas fibras quando se alcança uma deformação próxima de 10% e que o ângulo de atrito é totalmente mobilizado desde o início do processo. Heiss-Ziegler & Ferrer (2003) analisaram o comportamento das fibras na resistência do RSU. Pela Figura 3.25, percebe-se que no intervalo B, a tração nas fibras começa a atuar, mas, sua influência decai continuamente a partir do intervalo C, por sua ruptura.



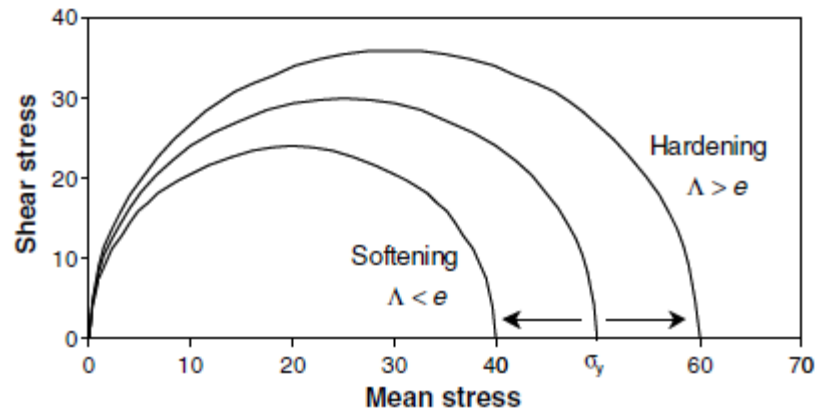
**Figura 3.25** – Influência das fibras no reforço dos RSU (Kolsch, 1995 *apud*. Machado *et al.*, 2008)

Com a degradação das fibras, há redução gradual do módulo de elasticidade. Machado *et al.* (2008) adotam um modelo cinético de primeira ordem para esse decaimento. Isso afeta diretamente o módulo de elasticidade transversal ( $G$ ) das fibras, em função do tempo. Com isso, mesmo que seja mantido um mesmo estado de tensões, parte da tensão desviadora que era suportada pelas fibras passará a ser suportada pela pasta. A tensão de escoamento ( $q_{\text{máx}}$ ) das fibras também se reduzirá com o passar do tempo. Os autores também utilizam um modelo de decaimento exponencial para essa grandeza. Pode ser entendido que, mesmo que o estado de tensões seja mantido, as fibras podem sair do regime elástico para o elastoplástico, desde que a redução de  $q_f$  seja menos acentuada que a redução de  $q_{\text{máx}}$ . Essa é uma condição necessária mas não suficiente para que ocorra o início da plastificação.

El-Fadel *et al.* (1999) relatam que o processo de perda de massa implica na geração de novos vazios e na mudança da resistência estrutural da matriz sólida. McDougall & Pyrah (2004) corroboram com a afirmação acima e estabelecem um ciclo. A decomposição de sólidos resulta no enfraquecimento da massa sólida. Depois, ocorre o colapso, pela matriz não suportar as tensões anteriormente impostas. Em sequência, há a densificação da matriz sólida, melhorando a sua capacidade de resistir às deformações. No entanto, o processo é restabelecido se ocorre o processo de decomposição.

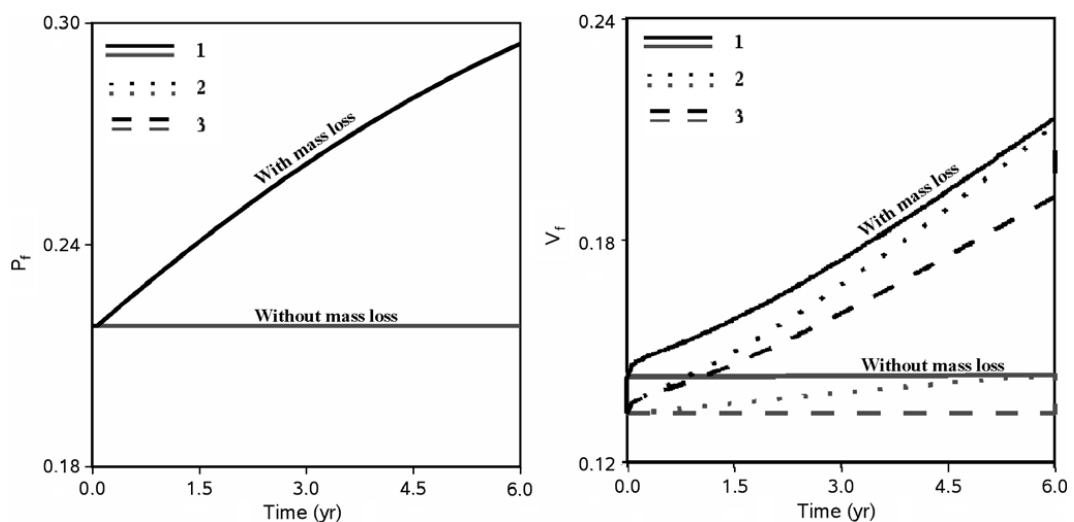
McDougall & Pyrah (2004) relacionam a decomposição dos sólidos degradáveis com o índice de vazios através de um parâmetro, denominado  $\Lambda$ . Ele é obtido a partir da razão entre  $dV_v$  e

$dV_s$ . Dependendo do valor de  $\Lambda$ , haverá o endurecimento ou enfraquecimento dos RSU, quando comparado com o índice de vazios. A Figura 3.26 mostra essas relações:



**Figura 3.26** - Influência do valor de  $\Lambda$  sobre o endurecimento dos RSU (McDougall, 2007)

A perda de massa é obtida diretamente em função dos processos de biodegradação. Ela é calculada diretamente pela geração de metano ocorrida na degradação anaeróbia, considerando um modelo cinético de primeira ordem, que represente o processo de geração de gás. Com isso, se pode obter diretamente a variação do teor de fibras e da pasta, representados respectivamente por  $(V_f$  e  $V_p)$ , representados como a razão entre o volume das fibras ou o volume da pasta, pelo volume total. Outras duas variáveis que podem ser obtidas diretamente são  $P_f$  e  $P_p$ , que simbolizam, respectivamente, a razão entre o peso seco das fibras pelo peso total seco do resíduo e a razão entre o peso seco da pasta pelo peso seco total do resíduo. No trabalho de Machado *et al.* (2008), são simuladas três trajetórias de tensão distintas, mas que têm o mesmo ponto inicial e o mesmo ponto final.



**Figura 3.27** – Influência da trajetória de tensões sobre  $P_f$  e  $V_f$  (Machado *et al.*, 2008)

Pela Figura 3.27, fica claro o aumento do teor de fibras com o passar do tempo. A variável  $V_f$  depende diretamente da variação de volume dos RSU com o tempo. Claramente, a trajetória de tensões influi nessa grandeza. Por exemplo, pode-se aplicar uma mesma carga em momentos diferentes e, seus efeitos também serão distintos, porque os valores de  $E$  e  $G$  são variáveis em função do tempo. A variável  $P_f$  não se altera com a trajetória de tensões. Isso ocorre porque ela depende apenas da variação da quantidade de massa sólida no interior do maciço. E essa, depende unicamente do processo de degradação.

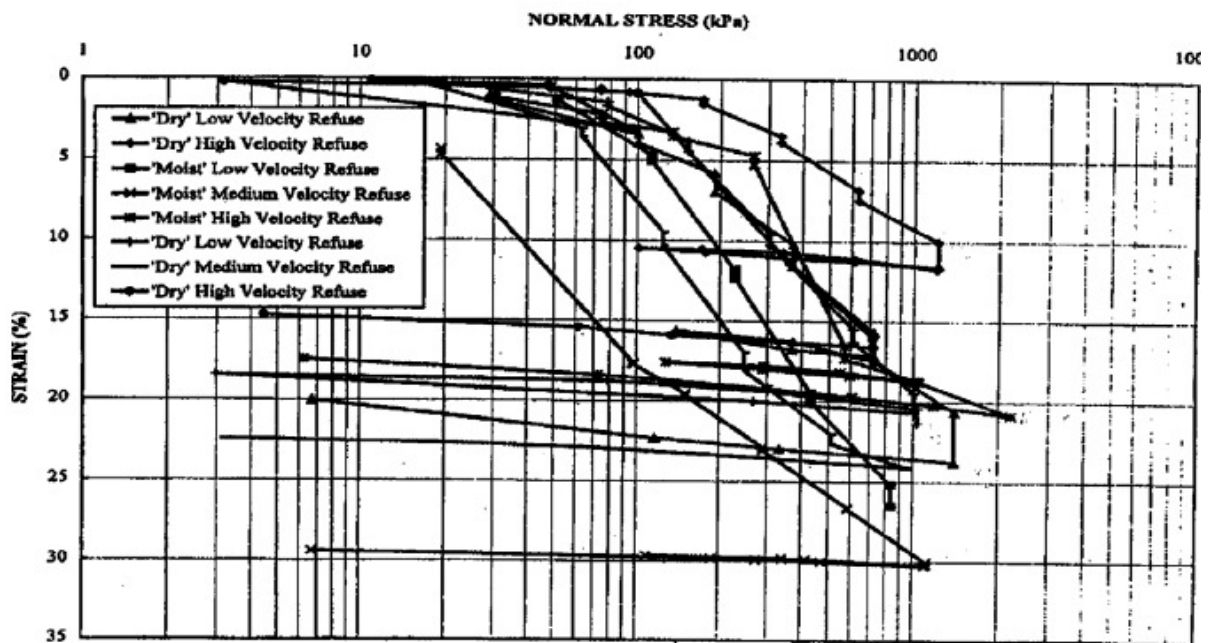
Além de simular algumas trajetórias de tensão para deixar clara a influência da perda de massa, foram simuladas a influência da presença das fibras no lixo e a influência da idade sobre os diagramas obtidos nos ensaios triaxiais. Em geral, a reprodução dos valores foi bastante satisfatória. O que deixou um pouco a desejar foram as curvas de  $\varepsilon_a \times \varepsilon_v$ . De modo geral, é um modelo bem completo mas, com inúmeros parâmetros, alguns de difícil obtenção. Contudo, traz substanciais evoluções em relação aos modelos mais comuns.

### **3.9.2 Modelo proposto por McDougall (2007)**

McDougall (2007) descreve a concepção de seu modelo, denominado HBM (Hidro-Bio-Mechanical), separado em três grandes partes: hidráulica, biodegradação e mecânica, sendo ligadas entre si. O modelo hidráulico estabelece um fluxo não-saturado, no qual as principais variáveis são a carga hidráulica e o teor de umidade.

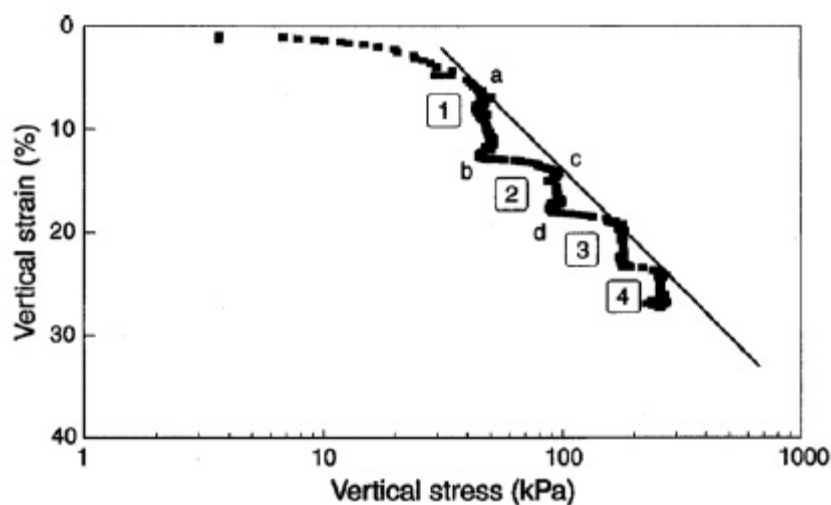
O modelo de biodegradação descreve a geração de gases a partir da decomposição anaeróbia, tendo como uma das principais variáveis o conteúdo volumétrico, obtido na equação de fluxo. Com isso, é obtido o decaimento dos substratos em função do tempo e da redução do volume de sólidos, que estão diretamente relacionados aos recalques.

O modelo mecânico calcula diretamente o valor dos recalques, separando o cálculo em três fases: devido ao incremento de cargas, ao fenômeno de *creep* e à biodegradação. A primeira parte adota um modelo elasto-plástico, com fator de endurecimento (*strain hardening*) e plasticidade associada, tendo como base o Modelo Modificado de Cam-Clay. McDougall (2007) justifica essa escolha, baseada na Figura 3.28, que ilustra o comportamento dos RSU em ensaios de compressão oedométrica, com descarregamento.



**Figura 3.28** – Ensaios oedométricos com descarregamento em RSU (Kavanzanjan, 1999 *apud*. McDougall 2007)

O fenômeno de *creep* é observado nos momentos onde os corpos são mantidos com tensão constante, similar ao adensamento secundário em solos. Nesse momento, as partículas se rearranjam para uma configuração mais estável, culminando numa redução do índice de vazios da estrutura. Anteriormente, esse aspecto foi modelado mais superficialmente, a partir de um modelo reológico visco-elástico. Tal fato pode ser observado no modelo unidimensional de Marques (2001). No modelo de McDougall (2007), é feito o cálculo desses recalques, a partir de um modelo visco-elastoplástico com endurecimento. A Figura 3.31 ilustra tais observações.



**Figura 3.29** – Comportamento visco-elastoplástico com endurecimento devido ao fenômeno de creep (McDougall, 2007)

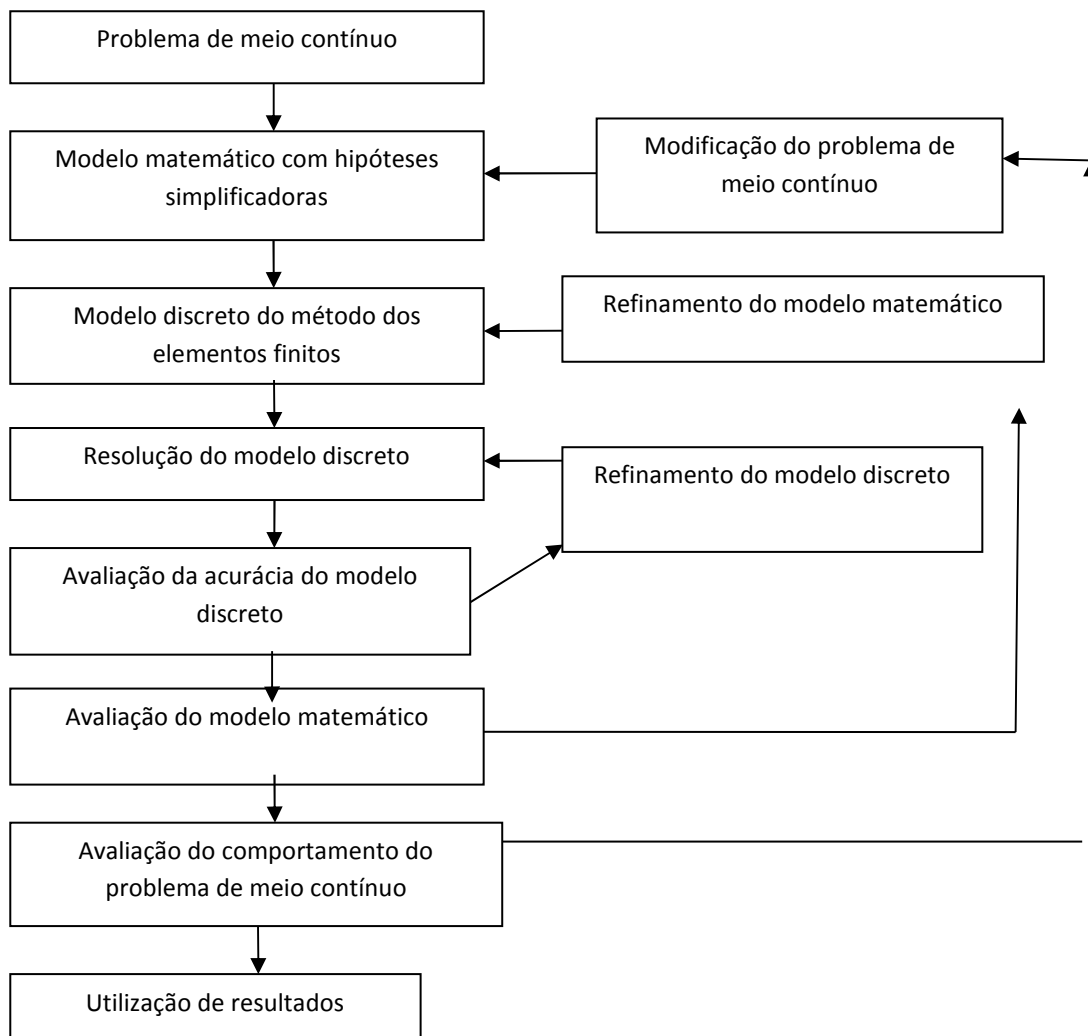
Quando o fenômeno de *creep* ocorre, há elevação de deformação, mantendo-se a mesma tensão (trajetória a/b), sendo a magnitude dessas deformações, dependentes do tempo (fenômeno viscoso). Além disso, há elevação da tensão de pré-adensamento (a/c), criando um estado de relativa rigidez. Ao invés de seguir a reta virgem, os carregamentos posteriores levarão os RSU a seguirem uma parcela elástica, seguida de uma elasto-plástica, depois de se atingir a nova tensão de pré-adensamento.

Na terceira parte, usa-se um modelo de biodegradação, cuja função de endurecimento está associada ao parâmetro  $\Lambda$ , similar ao  $\alpha$  usado no modelo de Machado *et al* (2008), conforme mostra a Figura 3.26.

### **3.10 O Método dos elementos finitos (MEF)**

O método dos elementos finitos (MEF) tem como principal aplicabilidade a resolução aproximada de problemas de valor de contorno em que a solução analítica é impossível de ser obtida. Para tal, há substituição de um meio contínuo por um modelo discreto, formado por uma malha de elementos, que por sua vez são definidos por pontos nodais. Ele é de grande aceitação em vários ramos de engenharia (cálculo de estruturas, campos elétricos e magnéticos, fluxo de fluidos etc.).

Focando-se na análise de estruturas, na forma convencional do método, podem ser obtidos os valores aproximados dos deslocamentos, deformações e tensões para qualquer posição do domínio, por meio da interpolação dos resultados encontrados em um número finito de pontos nodais. Sendo assim, no lugar de se descrever o comportamento estrutural analiticamente para todo o domínio, este é representado isoladamente no interior de cada elemento finito e compatibilizado ao longo de toda a malha, com base nas interpolações nodais. A Figura 3.30 apresenta um esquema da sequência de análise pelo MEF.



**Figura 3.30** – Sequência de análise pelo MEF

Inicialmente, o universo global é substituído por situações em escala reduzida, considerando a existência de um meio contínuo. Depois disso, são adotadas hipóteses simplificadoras, como modelos matemáticos, restrições nodais, dentre outros. Em seguida, faz-se a discretização do sistema. Para tal, os domínios são divididos em subdomínios de área finita (elementos), que juntos formam a malha do sistema. Neste novo sistema discreto, é obtida uma solução aproximada para o problema.

Para que se possam aproximar ao máximo os valores do modelo real (contínuo) aos obtidos na simulação numérica, maximizam-se o número de elementos, ou eleva-se o número de nós dentro de cada elemento. É relevante salientar que os resultados somente podem ser utilizados depois de feita a acurácia de todas as fases da simulação.

Para a realização das simulações com o MEF no presente trabalho, foram usados dois programas, cada um com suas particularidades.

O programa ANSYS Multiphysics é usado para a modelagem de escoamento, análises térmicas, estruturais e eletromagnéticas, usando o método dos elementos finitos. Trata-se de um programa comercial, com grande aceitação no mercado. O programa pode ser separado em três diferentes módulos:

- Pré-processamento: Nele, é feita a modelagem da estrutura, onde são definidos a geometria, o tipo de elemento associado, as propriedades dos materiais, os carregamentos, as restrições nodais, a numeração dos nós, linhas e áreas e a geração das malhas.
- Solução: Nesse módulo é definida uma análise estática ou transiente, o método de resolução a ser utilizado, o número máximo de iterações para a resolução do modelo, o aproveitamento ou não da geometria do passo anterior, dentre outros.
- Pós-processamento: Nele, são verificados os resultados obtidos pelos modelos, bem como as tensões, deformações e deslocamentos em todas as direções, em função de cada um dos incrementos de carga associados.

O programa GeoSlope é usado para análises geotécnicas e ambientais, como problemas de estabilidade, análises tensão-deformação, terremotos, transportes de poluentes, dentre outros. Foi utilizado neste trabalho o módulo denominado SIGMA/W, que realiza análises de problemas tensão-deformação.

Embora sejam programas que utilizam o MEF, eles apresentam diferenças significativas, no que tange a resolução de problemas de análises tensão x deformação com RSU. O programa ANSYS considera os conceitos de grandes e pequenos deslocamentos, implícitos na fase de solução. Além disso, deixa à escolha do usuário o método de resolução, através do tipo de método incremental-iterativo que pode ser usado e apresenta a possibilidade de análises transientes, que podem ser um diferencial em materiais como os resíduos. O programa SIGMA/W tem como principal diferencial a possibilidade do ajuste de cotas em projetos onde o enchimento acontece em etapas e o modelo hiperbólico, que representa com propriedade o aumento do módulo da elasticidade com a tensão confinante.



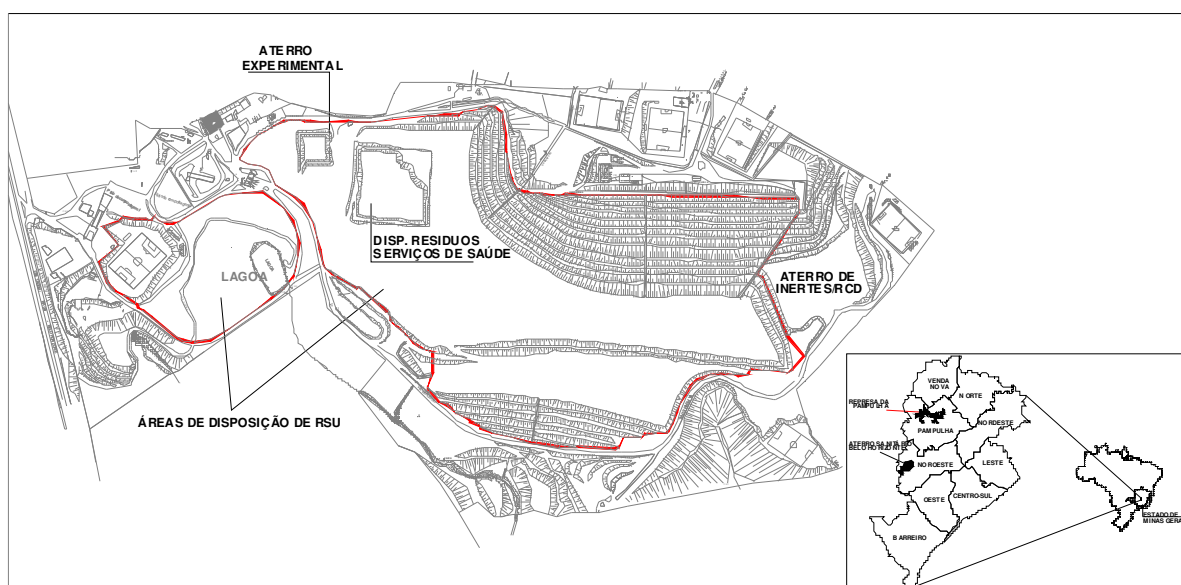
## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Área de estudo

A pesquisa foi realizada tendo como base os registros de monitoramento operacional e geotécnico do aterro sanitário de Belo Horizonte, localizado na região Noroeste da capital mineira. Ele iniciou a operação em 1975 e ocupa uma área de 145 hectares sendo operado pela Secretaria Municipal de Limpeza Urbana – SMLU (Catapreta *et al.*, 2002).

Durante 14 anos funcionou como aterro controlado, passando a energético em 1989, época em que os gases gerados passaram a ser reaproveitados. Em 1995, passou-se a adotar a técnica de biorremediação como forma de tratar a massa de resíduos aterrada e em 2002 voltou a ser operado de forma convencional.

O aterro sanitário encerrou o recebimento de resíduos comuns em 2007. Atualmente, são recebidos apenas resíduos de construção civil e de serviços de saúde, que têm como destino o aterro de inertes e uma célula hospitalar, respectivamente. A Figura 4.1 apresenta um *layout* geral da área da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos (CTRS).



**Figura 4.1** – *Layout* geral da CTRS da BR-040

Em 2007, o aterro sanitário de Belo Horizonte recebia aproximadamente de 4200 toneladas/dia de resíduo provenientes de uma população de cerca de 2,5 milhões de habitantes. A célula AC-05 é o objeto de estudo da pesquisa, estando ilustrada na Figura 4.2, juntamente com as células AC-03 e AC-04.



**Figura 4.2** – Visão geral dos taludes AC-03, AC-04 e AC-05 (em primeiro plano)

O programa de monitoramento do Aterro Sanitário da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040 faz parte do Plano de Controle Ambiental do empreendimento. Este programa foi iniciado, efetivamente, no ano de 1998. As principais atividades desenvolvidas compreenderam o monitoramento das águas superficiais e subterrâneas da área da CTRS, o monitoramento geotécnico, de gases e de líquidos lixiviados.

O monitoramento geotécnico foi iniciado no ano de 1995, envolvendo principalmente, o controle tecnológico dos materiais utilizados na construção das células de aterragem. A partir de 1998, este programa passou a ter como objetivos principais a avaliação do desempenho geomecânico do aterro sanitário, principalmente em termos de estabilidade. O monitoramento dos recalques superficiais é feito em inclinômetros e placas de recalque.

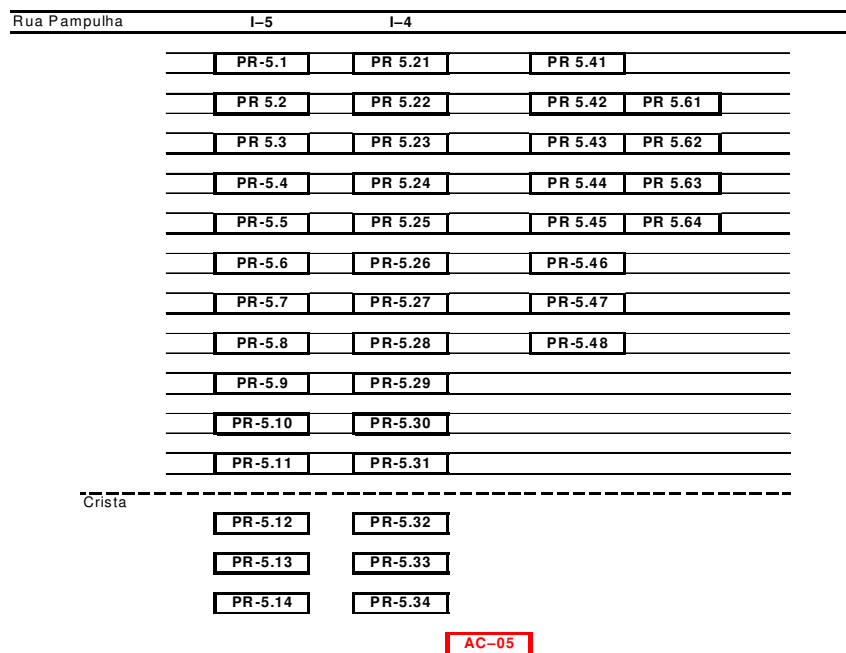
As leituras das placas de recalque e dos inclinômetros é feita semanalmente. As leituras das placas são realizadas por equipe de topografia contratada pela SMLU e são executadas por Nivelamento Geométrico de Precisão, por meio de Estação Total.

## **4.2 Análise dos registros de monitoramento**

### **4.2.1 Influência da correção das datas e cotas de construção e início de monitoramento**

O objetivo desta análise foi discutir a importância de se incorporar as correções de datas e cotas, na interpretação de registros de monitoramento de recalques.

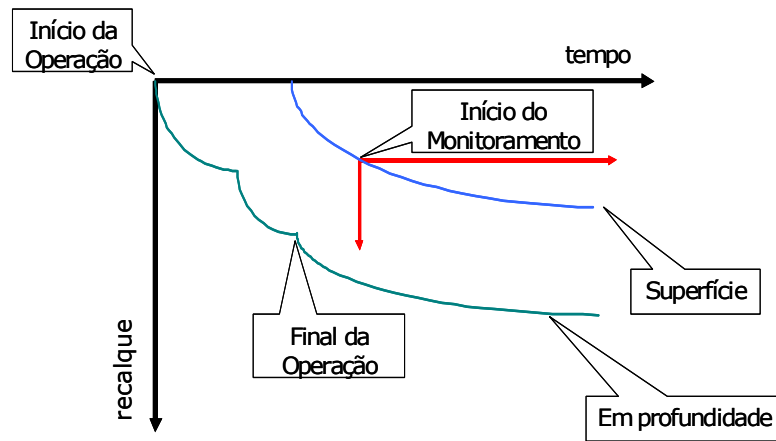
A célula AC-05 é monitorada por 40 placas de recalque e 2 inclinômetros. A Figura 4.3 apresenta um esquema de localização dos medidores de deslocamentos superficiais instalados na Célula AC-05.



**Figura 4.3** – Localização das placas de recalques na Célula AC-05

Uma das premissas usadas no estado plano de deformação é a de que uma das dimensões da estrutura seja muito maior do que as outras duas. Contudo a análise em 2D da célula AC-05 se torna plausível, porque não há deslocamento do maciço na direção perpendicular à seção transversal simulada, de acordo com os registros do monitoramento de campo. Isso ocorre apenas na porção que coincide com as duas primeiras séries de medidores (PR 5.1 até PR5.14 e de PR 5.21 até PR 5.34).

A análise dos dados de monitoramento foi feita a partir do levantamento das cotas da construção dos alteamentos, da instalação das placas de recalque e de base do aterro, na mesma abscissa dos medidores. Além disso, também foram restauradas as datas de instalação das placas de recalque e da data em que o topo de cada alteamento foi alcançado pelos resíduos. Conforme pode ser visualizado na Tabela 4.1, observa-se em alguns medidores, grandes intervalos de tempo entre o final da operação e o início do monitoramento. A Figura 4.4 exemplifica o procedimento realizado para correção das datas e cotas.



**Figura 4.4** – Esquema da interpretação realizada

Embora pareça um procedimento simples, ele está propenso a algumas fontes de erro, principalmente das cotas de topo e a data em que os RSU as alcançam. Esses dados foram obtidos com base em levantamentos topográficos de relatórios da SLU, que correlacionam a data alcançada em cada mês no histórico de enchimento do maciço e as cotas finais. Contudo, os valores de cota são apresentados, não raras às vezes, em intervalos de altitude, além de faltarem alguns meses desse levantamento prévio. Outro fator limitante é que o aterro não é preenchido de forma uniforme; isto é, um mesmo alteamento não tem um preenchimento contínuo, devido aos aspectos operacionais, tais como, redução de níveis de ruído em determinadas áreas e deterioração das plataformas de aterramento em períodos de elevada pluviosidade (Simões *et al.*, 2007).

Contudo, mesmo sujeito a alguns erros, o histórico de enchimento da célula AC-05 se mostrou coerente. O seu período de preenchimento foi de 60 meses, entre janeiro de 2001 e janeiro de 2006. Foram construídas 13 camadas de RSU, sendo a primeira com aproximadamente 10 metros e as demais, com 5 metros. O tempo de enchimento de cada alteamento, a data do início de monitoramento e as placas de recalque associadas são mostradas na Tabela 4.1. Ressalta-se que alguns medidores foram substituídos, sendo os registros utilizados neste trabalho somente os posteriores à reinstalação.

**Tabela 4.1 – Data de construção dos alteamentos**

Alteamento	Data construção topo	Placa de recalque	Data instalação placa
1	ago/2001	Inclinômetros	-----
2	dez/2001	5.1/5.21	out/2002
3	mar/2002	5.2/5.22	ago/2002
4	mar/2002	5.3/5.23	ago/2002
5	ago/2002	5.4	mar/2005
5	set/2002	5.24	out/2003
6	nov/2002	5.5	out/2004
6	dez/2002	5.25	out/2004
7	abr/2003	5.6/5.26	jul/2003
8	out/2003	5.7/5.27	ago/2004
9	mar/2004	5.8/5.28	nov/2004
10	ago/2004	5.9/5.29	jan/2006
11	jan/2005	5.10/5.30	ago/2006
12	jun/2005	5.11/5.31	ago/2006
13	jun/2006	5.12/5.13/5.32/5.33	ago/2006

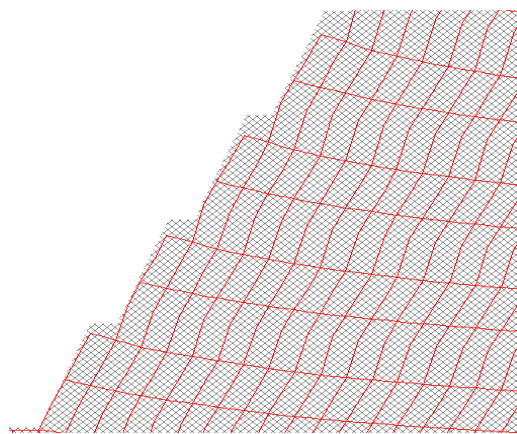
#### 4.2.2 Análise conjunta de deslocamentos verticais e horizontais

A análise da estabilidade dos taludes dos aterros sanitários pode ser considerada um ponto crítico desses empreendimentos, devido, principalmente às incertezas quanto aos parâmetros necessários à sua realização, tais como peso específico, resistência e níveis de poro-pressões.

Conforme salientado por Simões *et al.* (2007) a interpretação dos registros de monitoramento de recalques verticais e horizontais, quando analisados de forma integrada, pode fornecer importantes informações sobre as condições de estabilidade dos taludes dos aterros sanitários.

A interpretação de registros de monitoramento geotécnico para fins de avaliação das condições de estabilidade pressupõe a comparação da situação medida com padrões esperados de comportamento. Uma análise simplificada pode ser utilizada, considerando que em uma situação de estabilidade a inclinação resultante dos recalques verticais e horizontais deva ser uma inclinação inferior à inclinação do talude original.

Um exemplo de perfil de deslocamento de um talude de um aterro sanitário é mostrado na Figura 4.5, onde as linhas vermelhas representam a configuração já deformada e a região hachurada (em preto e branco), ao fundo, a configuração original. Esse seria o padrão esperado de movimentações.



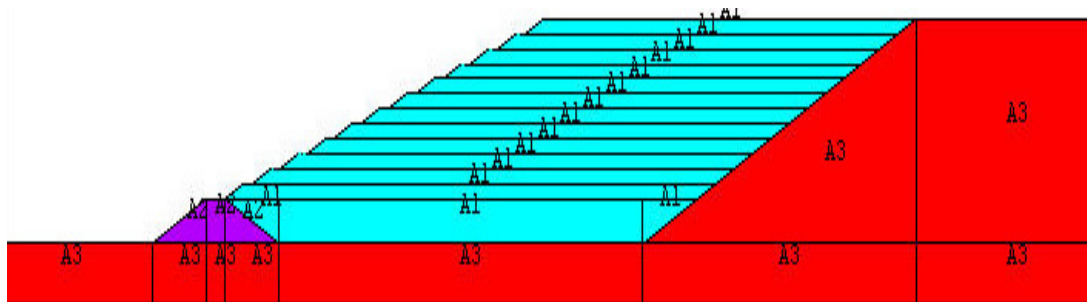
**Figura 4.5 – Padrão de movimentações esperado**

Apesar do exagero da escala da Figura 4.5, espera-se que o aterro deva se deslocar para uma posição mais interna em relação à anterior, em todos os alteamentos. Os nós da superfície se deslocam para baixo, na direção vertical e para a esquerda, no sentido horizontal. Portanto, se houver um deslocamento superior à inclinação 2H : 1V nos gráficos de deslocamento vertical x deslocamento horizontal, haverá superfícies mais inclinadas na configuração deformada do que na indeformada.

### **4.3 Análises com o programa ANSYS**

O programa ANSYS foi usado na primeira parte da modelagem numérica. Nele, estão explícitas as possibilidades de realizações de simulações com pequenos e grandes deslocamentos. Conforme será visto, os deslocamentos na direção vertical chegam a mais de 6 metros. Com isso, está implícita a necessidade de se fazer a análise considerando o regime de grandes deslocamentos (não linearidade-geométrica), o que não pode ser usado com o modelo hiperbólico do programa SIGMA/W (ideal para simulações onde é preponderante a consideração de aumento do módulo de elasticidade com o confinamento). Com isso, torna-se ideal verificar o tamanho do erro cometido no programa SIGMA/W, ao se realizar as análises utilizando o modelo hiperbólico, considerando apenas os regimes de pequenos deslocamentos.

Foram utilizadas 13 camadas distintas de RSU, cada uma com aproximadamente 200 metros de comprimento e com taludes de inclinação de 2H:1V. A altura total do aterro foi de 70 metros, sendo o primeiro alteamento de 10 metros e os restantes de 5 metros. Restrições nodais de deslocamento nas direções x e y foram impostas na base do solo (substituindo a interação solo/rocha) e nas paredes laterais, e representam a inexistência de deslocamentos. A Figura 4.6 mostra além da geometria, a diferenciação de três tipos de materiais, representados por cores distintas.



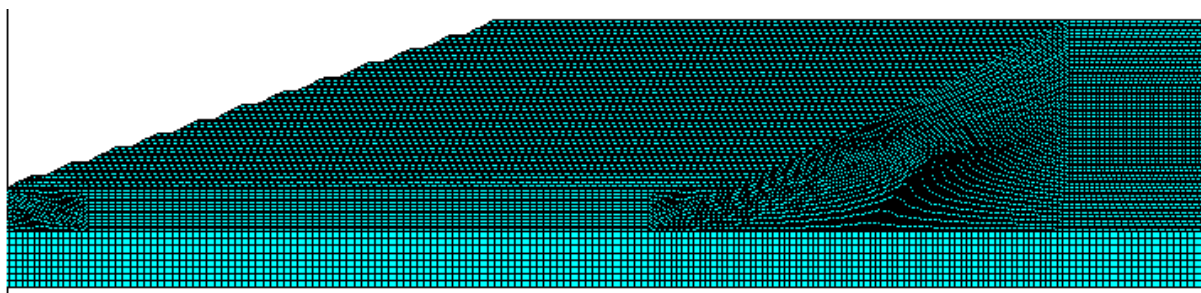
**Figura 4.6 – Geometria utilizada**

Os dados de entrada para a simulação inicial são apresentados na Tabela 4.2. A forma que esses parâmetros foram obtidos será comentada a seguir.

**Tabela 4.2 – Propriedades dos materiais**

Camadas	$\gamma$ (kN / m <sup>3</sup> )	E (kPa)	$\nu$
Dique	18	12000	0,25
RSU	10	2300	0,30
Solo	-	50000	0,25

O elemento escolhido foi o denominado *Plane 82*, que se caracteriza por ser um elemento quadrangular de 8 nós (4 vértices e 4 pontos nas medianas dos lados). As dimensões desse quadrilátero foram de 2,5 m, condizentes com o tamanho da estrutura e capazes de se realizar uma análise com acurácia. A Figura 4.7 ilustra a geometria, com a malha utilizada.



**Figura 4.7 – Geometria discretizada**

As análises foram realizadas seguindo o sequenciamento de enchimento da célula AC-05. Ou seja, foram usados 13 passos de cálculo diferenciados e sequenciais, representando o histórico de enchimento do aterro, tanto para o regime de grandes quanto para o de pequenos deslocamentos. Além disso, foram aproveitadas as deformadas de todos os incrementos de carga a cada incremento de carga (*loadstep*).

### 4.3.1 Estimativa de parâmetros de RSU

Os valores do módulo de Elasticidade e do coeficiente de Poisson foram obtidos tendo por base três pesquisas distintas: Carvalho (1999), Carvalho *et al.* (2006) e Nascimento (2007). Foram ensaiados corpos de prova com peso específico de 10 kN/m<sup>3</sup>. As duas primeiras tiveram como base, o aterro Bandeirantes, em São Paulo. A última foi realizada com amostras coletadas no aterro Metropolitano Centro, em Salvador.

A primeira pesquisa teve amostrados resíduos com 15 anos de idade, sendo feitos ensaios triaxiais drenados, em umidade natural. Os outros dois foram realizados na condição saturada, comparando-se resíduos novos e com 4 anos de idade. A Tabela 4.3 sumariza a variação dos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios triaxiais realizados nas pesquisas mencionadas.

**Tabela 4.3 – Módulo de Elasticidade para diferentes tensões confinantes**

$\sigma_3$ (kPa)			E (kPa)
50	100	200	
0,88 - 0,97	1,44 - 1,97	2,41 - 3,46	

A tensão confinante média nas simulações do aterro sanitário foi de 160 kPa. Pela inspeção dos dados da Tabela 4.3, adotou-se o valor de  $E = 2,3$  MPa. A Tabela 4.4 mostra os valores do coeficiente de Poisson obtidos nos trabalhos anteriormente referenciados. O valor adotado para o coeficiente de Poisson foi de 0,30.

**Tabela 4.4 – Coeficiente de Poisson para diferentes tensões confinantes**

$\sigma_3$ (kPa)			$\nu$
50	100	200	
0,25 - 0,32	0,28 - 0,38	0,28 - 0,30	

Foi adotado o peso específico de  $\gamma = 10$  kN/m<sup>3</sup> para os RSU, com base no trabalho de Catapreta e Simões (2007). Algumas pesquisas relatam a mudança do peso específico em função do tempo. Isso ocorre devido à perda de massa e à redução do volume total dos resíduos. Essa redução é de difícil modelagem, sendo desconsiderada nessa etapa do trabalho.

### 4.3.2 Estimativa de parâmetros do dique e do solo

Os valores das propriedades do dique e do solo da fundação da célula, apresentados na Tabela 4.2, foram obtidos no relatório CEMIG (2003). Optou-se pela utilização de um peso específico nulo para o solo de fundação, devido ao mesmo já estar adensado antes do processo de construção, operação e fechamento do aterro. Além disso, deseja-se visualizar apenas a interferência do carregamento dos RSU e do dique no aterro sanitário.



#### **4.4 Análises com o programa SIGMA/W**

No programa SIGMA/W, foram usados dois modelos: elástico linear e hiperbólico. A geometria, a malha de cálculo, as restrições nodais, o número de passos de cálculo e o método de resolução foram os mesmos.

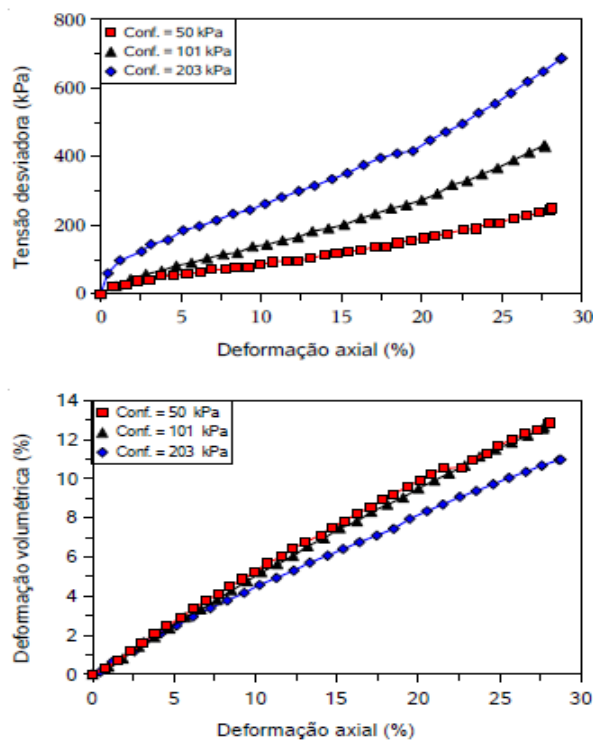
##### **4.4.1 Análise pelo modelo elástico linear**

A primeira análise realizada utilizou o modelo elástico linear. Ela também foi feita sob dois aspectos, de forma única e com 13 passos incrementais, a fim de simular o histórico de enchimento do aterro. Os parâmetros usados são os apresentados na Tabela 4.2. No pós-processamento, foram analisados os recalques nas direções horizontais e verticais, os perfis e o volume ganho em cada camada de RSU disposta, devido aos recalques.

Um aspecto essencial na simulação é o ajuste de cotas a cada incremento de carregamento, disponível no programa SIGMA/W. Inicialmente, é feito no pré-processamento, o desenho de toda a geometria do aterro, bem como a aplicação do carregamento e das restrições nodais. Na fase de solução, simula-se o primeiro incremento de carregamento (primeira camada do aterro). Ela se deforma normalmente, ilustrando os recalques calculados. No programa ANSYS, as camadas superiores se deformam como corpo rígido, acima da primeira camada, mantendo-se a espessura especificada no desenho já feito no pré-processamento. Ao se fazer o segundo incremento de carregamento no programa SIGMA/W, a parcela deformada na camada 1, obtida no passo anterior é “preenchida” com o mesmo material da camada 2. Isso torna possível o cálculo dos volumes ganhos durante o enchimento do aterro e simula a realidade do processo.

##### **4.4.2 Análise pelo modelo hiperbólico**

A simulação com o modelo hiperbólico foi realizada para representar o aumento do módulo de elasticidade em função da tensão confinante. Os ensaios triaxiais que serviram de base para a calibração dos parâmetros do modelo hiperbólico utilizados no programa SIGMA/W foram obtidos em Nascimento (2007), podendo ser visualizados na Figura 4.8.



**Figura 4.8** – Resultados utilizados na calibração do modelo hiperbólico (Nascimento, 2007)

Os valores de alguns pontos dos gráficos tensão desviadora x deformação axial ( $\sigma_d \times \epsilon_1$ ) e deformação volumétrica x deformação axial ( $\epsilon_v \times \epsilon_1$ ) para as tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa são apresentados na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5** – Resultados de ensaios triaxiais utilizados na calibração do modelo hiperbólico

$\sigma_3 = 50 \text{ kPa}$			$\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$			$\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$		
$\epsilon_1$ (%)	$\sigma_d$ (kPa)	$\epsilon_v$ (%)	$\epsilon_1$ (%)	$\sigma_d$ (kPa)	$\epsilon_v$ (%)	$\epsilon_1$ (%)	$\sigma_d$ (kPa)	$\epsilon_v$ (%)
1,7	15	0,9	1,8	35	0,8	2,2	80	0,7
3	40	1,7	3,5	70	1,8	4	130	1,6
5	55	2,6	5,2	100	2,8	5,5	180	2,6
7	70	3,2	7,3	130	3,7	7,5	220	3,4
8,5	90	3,8	9,5	145	4,5	9,5	270	4,5
11	100	4,5	11	185	5,1	11,5	310	5,2
12,5	110	5,1	12,5	200	5,9	13	370	6
14,5	120	5,8	14,5	220	6,7	15	410	6,8
16	135	6,4	17	240	7,2	17,2	470	7,3
17,8	150	6,9	18	250	8	19	510	8
19	170	7,3	20	280	8,6	20,6	580	8,6
21	195	7,8	22,2	300	9,1	22,8	660	9,5
22,5	205	8,4	23,8	320	9,7	24,8	740	10,5
24	230	9	25,3	360	10,4			

Os primeiros cálculos foram para a determinação dos valores do módulo de elasticidade inicial ( $E_i$ ) e do valor assintótico  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  nos gráficos de tensão desviadora x deformação,

para cada uma das três tensões confinantes do ensaio triaxial. Isso é feito com a construção dos gráficos  $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) \times \varepsilon_1$ . Os valores de  $E_i$  e  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  são apresentados na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6** – Valores dos módulos de elasticidade inicial em função da tensão confinante

$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200
$E_i$ (MPa)	1,05	2,03	3,24
$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ (kPa)	930	1140	4000

Em seguida, são obtidos os valores de  $K$  e  $n$  pela construção dos gráficos de  $\log(E_i/Pa) \times \log(\sigma_3/Pa)$ . Os valores obtidos foram de  $K = 19,06$  e  $n = 0,81$ .

A terceira etapa dos cálculos refere-se aos valores de ruptura, que não são visualizados explicitamente nos ensaios triaxiais. Na pesquisa, foram definidos aqueles onde a deformação apresentada é de 20%. Pela construção dos gráficos de  $p_{rupt} \times q_{rupt}$ , são obtidos os parâmetros de Lambe, sendo  $h$  o coeficiente linear da reta interpolada e  $\alpha$  o ângulo de inclinação da reta. Os valores de  $p$  e  $q$  são definidos pelas Equações 4.1 e 4.2:

$$p = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} \quad (4.1)$$

$$q = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \quad (4.2)$$

Em seguida, são obtidos os parâmetros de resistência dos RSU ( $c$ ,  $\phi$ ) por meio das Equações 4.3 e 4.4. Os valores obtidos foram  $c = 7,38$  kPa e  $\Phi = 35,23^\circ$ .

$$c = \frac{h}{\cos(\phi)} \quad (4.3)$$

$$\phi = \arcsen(\operatorname{tg}(\alpha)) \quad (4.4)$$

Em que:  $\alpha$  - ângulo de inclinação do gráfico  $p_{rupt} \times q_{rupt}$  (graus);  $h$  - coeficiente linear do gráfico  $p_{rupt} \times q_{rupt}$  (kPa);  $c$  - coesão do solo (kPa);  $f$  - ângulo de atrito dos RSU (graus).

O último parâmetro obtido, ligado aos valores de ruptura é a razão de ruptura ( $R_f$ ). Foram obtidos os valores de  $R_f$  para os três ensaios e calculados o seu valor médio. A fórmula usada para seu cálculo é apresentada na Equação 4.5. O valor médio de  $R_f$  foi de 0,204.

$$R_f = \frac{[2.c.\cos(\phi) + 2.\operatorname{sen}(\phi).\sigma_3]}{[1 - \operatorname{sen}(\phi)].(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (4.5)$$

O passo posterior passa pela obtenção dos valores relacionados ao módulo de deformação volumétrica (B). Primeiramente, é obtido o seu valor para cada tensão confinante, através da Equação 4.6.

$$B_i = \frac{2 \cdot \sigma_3}{3 \cdot \varepsilon_v} \quad (4.6)$$

Com a construção do gráfico de  $\log(\sigma_3/Pa)$  x  $\log(B_i/Pa)$ , foram obtidos os valores de  $K_B = 12,44$  e  $m = 0,75$ .

Para a construção das novas curvas, que seguem o modelo hiperbólico são usados alguns passos. O primeiro deles é a obtenção dos novos valores dos parâmetros a e b. Para tal, usam-se as Equações 4.7 e 4.8. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 4.7.

$$a = \frac{1}{\left[ k \cdot Pa \cdot \left( \frac{\sigma_3}{Pa} \right)^n \right]} \quad (4.7)$$

$$b = \frac{R_{\text{médio}}}{\left[ (2 \cdot c \cdot \cos \phi + 2 \cdot \sigma_3 \cdot \text{sen} \phi) \right] (1 - \text{sen} \phi)} \quad (4.8)$$

**Tabela 4.7 – Novos parâmetros do modelo hiperbólico**

$\sigma_3$ (kPa)	b (1/kPa)	a (1/kPa)
<b>50</b>	0,00124	0,00092
<b>100</b>	0,00068	0,00052
<b>200</b>	0,00035	0,00030

Depois disso, obtém-se o novo valor de q. A Equação 4.9 rege tal parâmetro.

$$q = \frac{2 \cdot \varepsilon_1}{(a + b \cdot \varepsilon_1)} \quad (4.9)$$

Para a obtenção de  $\varepsilon_v$ , é necessário usar os valores do módulo de deformação volumétrica, calculados a partir dos parâmetros  $K_B$  e m. Esses valores de B são mostrados na Tabela 4.8.

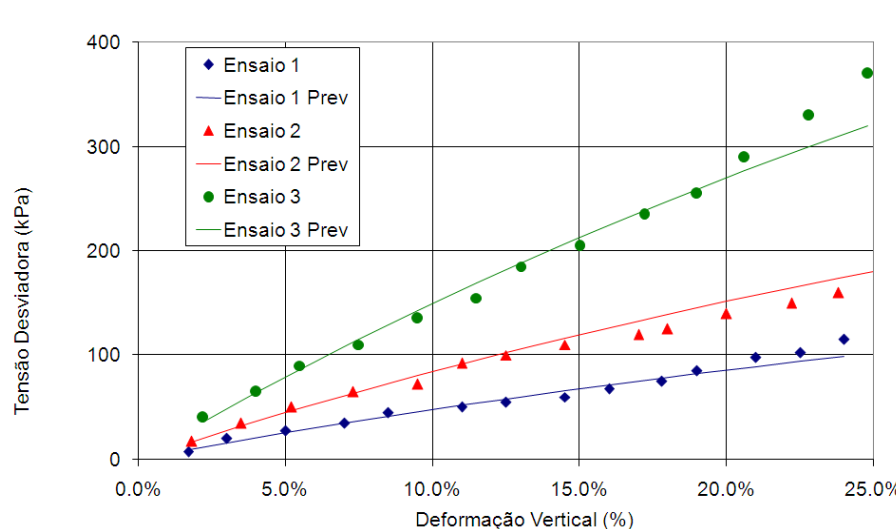
**Tabela 4.8** – Coeficientes de deformação volumétrica do modelo hiperbólico, para cada tensão confinante

$\sigma_3$ (kPa)	B (kPa)
50	737,33
100	1244,21
200	2099,57

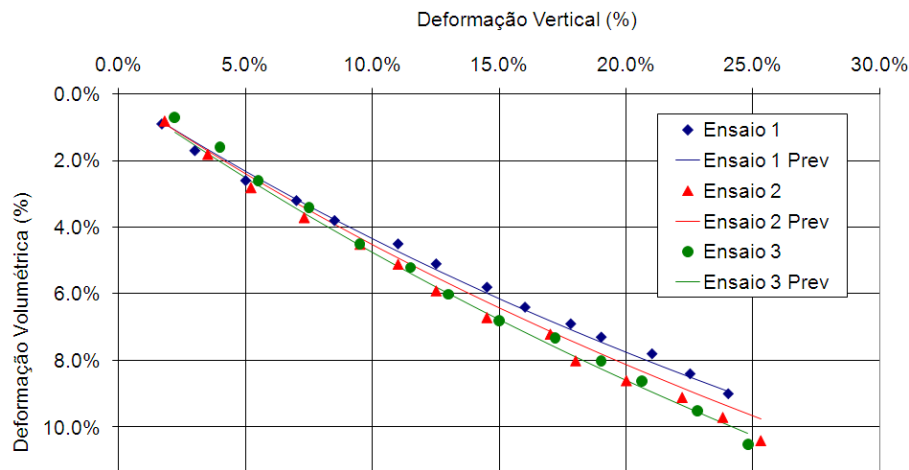
Como se mencionou anteriormente, no modelo hiperbólico, adota-se uma aproximação, que o valor de B é constante e independente da tensão desviadora, mas cresce com a tensão confinante. A expressão com a qual se obtém os novos valores da deformação volumétrica é dada pela equação 4.10.

$$\varepsilon_v = \frac{2.q}{(3.B_f)} \quad (4.10)$$

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam as curvas tensão desviadora x deformação axial e deformação volumétrica x deformação axial para as tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa obtidas nos ensaios e com o modelo hiperbólico calibrado. A inspeção das figuras mostra que o formato das curvas dos ensaios triaxiais se difere bastante de uma hipérbole. Isso pode ser comprovado pelo baixo valor de  $R_f$  médio encontrado (0,204), o que condiciona uma aproximação pouco eficaz entre a realidade e o comportamento teórico. Os valores assintóticos de tensão desviadora em todas as três curvas são bastante altos. No entanto para os níveis de deformação de interesse (inferiores a 25%) as curvas apresentam um bom ajuste, possibilitando a representação da variação do módulo da elasticidade com a tensão confinante, no regime elástico.

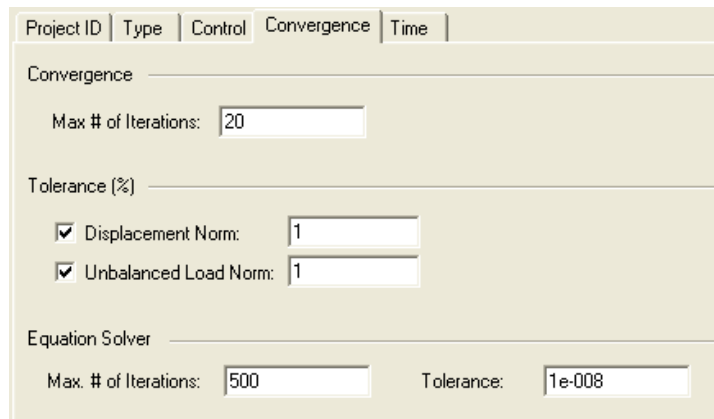


**Figura 4.9** – Aproximações das curvas tensão x deformação com o modelo hiperbólico



**Figura 4.10** – Aproximações das curvas ( $\epsilon_v \times \epsilon_1$ ) com o modelo hiperbólico

Outro ponto importante está relacionado aos critérios de convergência. Os valores adotados são mostrados na Figura 4.11.



**Figura 4.11** - Critérios de convergência usados nas simulações com o programa SIGMA/W

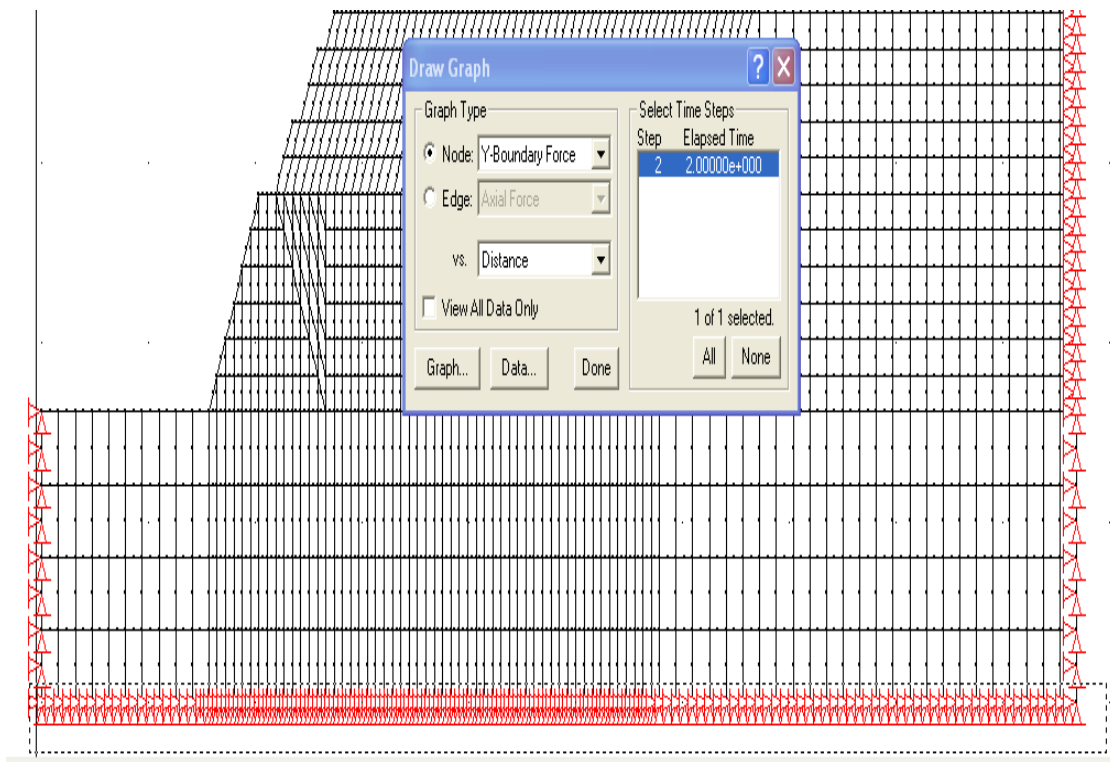
No campo de convergência, está presente o número máximo de iterações feitas no método Newton-Raphson para se atingir os critérios de tolerância, em cada passo de carga. No segundo campo, está especificada a tolerância máxima usada para as normas que relacionam a correção dos deslocamentos iterativos com os deslocamentos totais e os resíduos de força do problema não-linear, com as forças totais. O terceiro campo se refere ao campo do método de resolução de sistemas lineares. O máximo de iterações corresponde à maior quantidade possível de incrementos usados para solucionar o sistema linear e o segundo, corresponde à razão entre a norma dos incrementos usados e o último vetor solução especificado. Os parâmetros estabelecidos foram bem especificados, uma vez que as simulações são bastante rápidas e a convergência é alcançada quase que instantaneamente.

#### 4.4.2.1 Cálculo dos volumes úteis

As simulações de enchimento utilizando o programa SIGMA/W acontecem em diferentes momentos, ou seja, a primeira camada do aterro é associada ao primeiro incremento de carregamento. Depois disso, com a opção de ajuste de cotas ativada, é simulado o segundo momento de enchimento do aterro, estando presentes a primeira camada deformada, com o peso da indeformada, a porção dela, que foi anteriormente recalçada e a segunda, indeformada. No incremento de carregamento inicial, estão presentes como cargas o peso próprio do dique e o da primeira camada. No segundo passo, são mantidas as cargas anteriores, sendo adicionado à simulação o peso da segunda camada e o da área que foi recalçada no primeiro passo, correspondendo à função de ajuste de cotas, já comentada.

Esse entendimento sobre o uso do programa SIGMA/W em simulações evolutivas, permite que seja feito o cálculo do volume útil que se ganha durante o enchimento do aterro, sabendo que nessa simulação considera-se uma seção 2D, sendo repetida o seu comportamento ao longo da dimensão longitudinal. Esse cálculo foi feito seguindo os procedimentos:

- Faz-se a simulação do primeiro e do segundo passos de carga;
- Levanta-se a quantidade total de forças que atuam na estrutura, através do somatório das reações nodais verticais;
- Calcula-se a área total das estruturas indeformadas, bem como seu respectivo peso;
- A diferença entre o somatório de reações nodais verticais, no segundo incremento de carregamento, e do somatório dos pesos das estruturas indeformadas (camadas 1 e 2), correspondem ao peso da porção recalçada;
- Transforma-se esse peso das indeformadas, nas áreas correspondentes, através do peso específico dos RSU;
- Repetem-se esses procedimentos em todos os incrementos de carregamento (2 ao 13), sendo a diferença entre o somatório das reações nodais e das estruturas indeformadas igual ao peso das deformadas anteriores. Como exemplo, tem-se que se o procedimento for realizado no incremento de carregamento 3, obtém-se o peso das deformadas dos passos de carga anteriores (1 e 2).



**Figura 4.12** – Modo de obtenção das forças nodais no incremento de carregamento 2

Na Figura 4.12, o quadro pontilhado na base significa os pontos onde são obtidas as variáveis de interesse. Na janela central, estão apresentados o incremento de carregamento considerado (2), na porção direita da tela e, na esquerda, as variáveis de interesse (forças nodais e distância).

Claramente, ao se realizar o procedimento dos somatórios no incremento de carregamento 13, serão obtidas as áreas deformadas até o passo de carga 12. Para se obter o peso da deformada do passo de carga 13, utilizou-se a regra de Simpson. Ela consiste na obtenção da área abaixo de uma função, só que ao invés de se usar uma integral, utilizam-se trapézios como aproximação.

O uso dessa técnica se refere à área da deformada do passo de carga 13. Para tal, são gerados no pós-processamento, pares cartesianos onde, as abscissas representam as coordenadas em x dos nós do topo da última camada e nas ordenadas, os deslocamentos desses nós em y. Claramente, quanto maior for o espaçamento entre os nós, menor a acurácia dos resultados. O somatório total das áreas dos trapézios corresponde às áreas da deformada do incremento de carregamento 13.

Claramente, existem deslocamentos em x e, para o cálculo real, seria necessária a soma das integrais de  $x.dy + y.dx$ . Contudo, essa é uma aproximação bastante coerente, até por



comparação direta, entre o primeiro método, que apresenta os valores reais e, esse último, aproximado.

#### **4.5 Análise unidimensional**

O modelo apresentado por Simões (2000) tem em cada alteamento vários parâmetros: as taxas de biodegradação dos materiais constituintes, a biodegradabilidade potencial (BP) e os valores de CR e Ca. O ajuste dos deslocamentos verticais simulados foi feito pela estimativa de cada variável, sem o uso de nenhuma técnica de otimização. Tal fato melhoraria os resultados obtidos, mas esse recurso ainda não está disponível no programa utilizado.

Foi usada a composição gravimétrica típica dos RSU que chegam ao aterro de Belo Horizonte, sendo cada fração separada em virtude da velocidade de biodegradação. A origem dos resíduos e a sua composição gravimétrica estão apresentadas nas Tabelas 4.9 e 4.10.

**Tabela 4.9** – Origem dos RSU de Belo Horizonte (Simões *et al.*, 2004)

<b>Origem</b>	<b>% em massa</b>
Domiciliar e comercial	54,50
Construção civil	25,06
Unidades de saúde	1,21
Público (capina, varrição, poda)	14,50
Outros	4,73
Total	100,00

**Tabela 4.10** – Composição gravimétrica do aterro de BH (Simões *et al.*, 2004)

<b>Componente</b>	<b>% em massa</b>
Matéria orgânica	65,46
Papel	10,11
Plástico	11,27
Metal	2,65
Vidros	2,39
Rejeitos	8,12
Total	100,00

Foram usados 4 materiais constituintes distintos: inertes, lenta, média e rapidamente biodegradáveis, que tiveram como referência o artigo de Simões e Lanes (2009). A Tabela 4.11 sumariza as divisões.

**Tabela 4.11 – Agrupamento dos materiais constituintes pela velocidade de biodegradação**

<b>Tipos de Materiais</b>	<b>Velocidade de Degradação</b>
Alimentos, papel, papelão e orgânicos	Rápida
Madeiras e podas	Média
Tecidos, couro, bolacha, madeira e plástico	Baixa
Lata, vidro, solo, entulho e cinzas	Inerte

A composição gravimétrica da Tabela 4.10 está relacionada unicamente aos resíduos domiciliares e comerciais. Com isso, todos esses percentuais devem ser multiplicados por 0,55. Agrupando-se papéis e orgânicos no grupo de materiais rapidamente biodegradáveis, chega-se a um percentual próximo de 40% do total. Dos 14% de resíduos públicos, estima-se que 10% sejam de média velocidade de biodegradação (madeiras e podas) e os outros 4% seja de materiais com lenta velocidade (alguns resíduos de varrição – madeira). Além disso, cerca de 6% (plásticos) é somado aos 4% anteriormente referidos, chegando-se também a um total de 10%. Estima-se que 40% sejam de materiais inertes, sendo 25% de resíduos de construção civil, 3% de vidros e metais, 4% de rejeitos e 5% dos outros materiais.

A divisão dos resíduos agrupados, de acordo com a velocidade de degradação dos mesmos, pode ser sumarizada na Tabela 4.12, sendo o procedimento descrito no parágrafo anterior.

**Tabela 4.12 – Percentuais dos agrupamentos de RSU**

<b>Velocidade de biodegradação</b>	<b>Componentes</b>
Rápida (40%)	Orgânicos (35%) e Papel (5%)
Média (10%)	Madeiras e podas (10%) – Resíduos públicos
Baixa (10%)	Plásticos (6%) e Madeiras (4%) – Varrição
Inerte (40%)	RCC (25%), Vidros e Metais (3%), Rejeitos (4%) e Outros (5%)

Para se obter os valores de  $K_{ij}$ , definido na Equação (3.7), é necessário o estabelecimento do tempo em que 90% ( $T_{90}$ ) do material constituinte será decomposto. A Tabela 4.12 estabelece o valor  $T_{90}$  em cada uma das frações, bem como o das taxas de biodegradação.

**Tabela 4.13 – Valor das taxas de biodegradação das frações constituintes do RSU**

<b>Velocidade de degradação</b>	<b><math>T_{90}</math> (anos)</b>	<b><math>K_{ij}</math> (1/ano)</b>
Lenta	20	0,12
Média	7	0,33
Rápida	3	0,77

Depois de obtidos os valores das taxas de biodegradação, foram feitas unicamente simulações iterativas, para se obter o melhor valor de CR. O valor mais razoável foi o de 0,20.

Conjuntamente, foram feitos alguns testes para se determinar a influência do parâmetro  $C\alpha$ . Adotou-se o valor de 1.0%, que é bem adequado, se comparado com os valores reportados na literatura, sumarizados na Tabela 3.8. Um parâmetro de grande influência, que foi o tema principal dessa simulação foi a biodegradabilidade potencial.

O primeiro valor adotado foi o de 0,40 para todos os alteamentos. Notou-se que os deslocamentos verticais obtidos em todos os pontos de medição eram extremamente inferiores aos obtidos no monitoramento. Com isso, realizaram-se novos testes. Os novos valores foram de  $BP = 0,50$  e de  $BP = 0,60$ . Para o primeiro, houve a mesma observação relatada no parágrafo anterior. Para o segundo, os valores simulados foram bem mais elevados que os medidos na simulação. Com isso, foram utilizados valores distintos de  $BP$ , variando em função do grau de saturação do aterro. Após variações sucessivas, foram obtidos os valores ótimos:  $BP = 0,50$  nos três primeiros alteamentos, de  $BP = 0,60$  da quarta até a nona camada e  $BP = 0,50$  da décima até a décima terceira camada. A justificativa dessa biodegradabilidade potencial está na otimização dos processos de decomposição. Para profundidades reduzidas, há um grau de saturação baixo, ocasionando condições não ótimas de biodegradação. No meio do aterro, cresce um pouco o teor de umidade, elevando a potencialidade de transformação da matéria orgânica. Nas regiões mais profundas, os microrganismos estão imersos nos líquidos lixiviados, reduzindo a velocidade das reações anaeróbias.

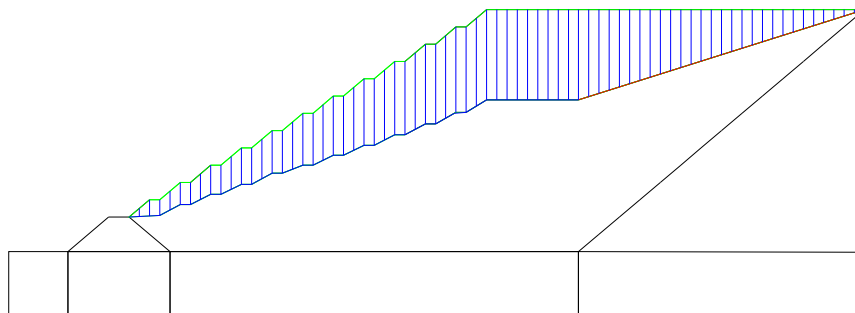
A calibração dos modelos teve como pontos principais de comparação as medidas no tempo final de monitoramento. Depois disso, foram geradas as curvas de recalque vertical de todos os alteamentos durante o período de monitoramento.

#### **4.5.1 Cálculo de volumes ganhos pelo recalque**

Com o modelo unidimensional de recalques de Simões (2000), foi possível se obter o volume ganho durante a fase de enchimento do aterro, depois de feita a obtenção dos parâmetros e após a calibração com as curvas obtidas nos dados de monitoramento. Para tal, foram lidos nos arquivos de saída do modelo calibrado, os valores de deslocamentos verticais de todos os alteamentos no mês 60, que coincide com o mês final de aterramento da célula AC-05.

Em seguida, gerou-se o desenho do aterro, já considerando a sua configuração deformada. Para tal, os pontos base para a geração dessa imagem foram os nós na base e no topo de cada alteamento, considerando as faces dos taludes. Considerou-se que cada alteamento comporta-se como um corpo rígido, sem que haja recalques diferenciais nas partes inicialmente planas do aterro. Com isso, foram mantidas as posições das abscissas de cada nó, sendo transladadas

as suas ordenadas, a partir dos recalques simulados. A Figura 4.13 mostra o desenho gerado para o cálculo das áreas.



**Figura 4.13** – Desenho para cálculo do ganho de volume devido aos recalques

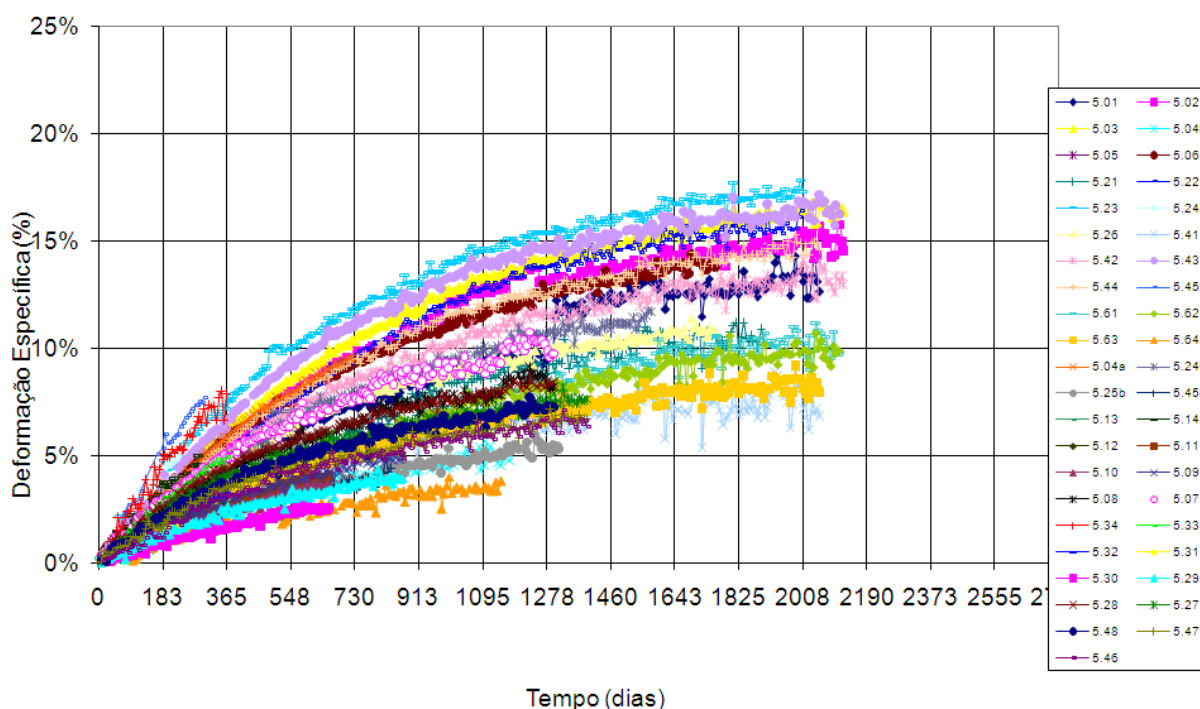
A área hachurada no aterro corresponde ao recalque em todo o enchimento do aterro. As linhas verdes correspondem às bermas na configuração original e as azuis à configuração deformada. No segmento de reta que corresponde à linha vermelha, sabe-se os recalques apenas nos nós iniciais e finais dessa linha. No extremo mais à esquerda o deslocamento vertical coincide com o lido no alteamento 13, no mês 60. Estabeleceu-se um recalque zero no outro ponto extremo. Como não se conhece as cotas de cada um dos pontos da linha vermelha, de acordo com a simulação, estabeleceu-se um gradiente linear entre esses dois pontos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Interpretação dos registros de monitoramento

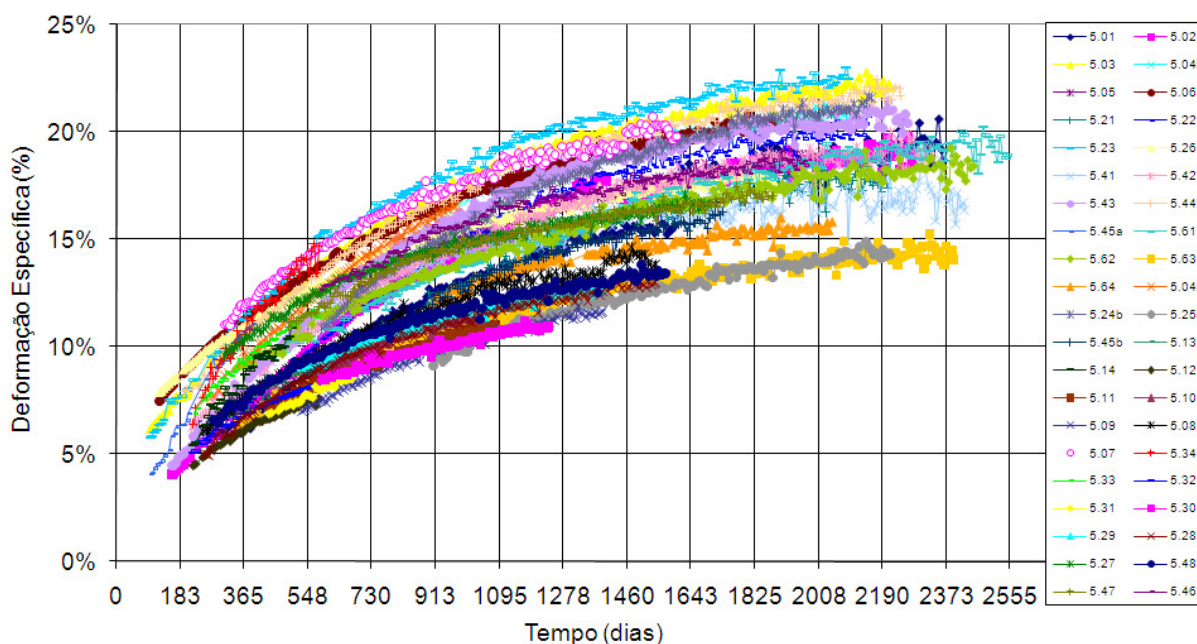
É comum observar em trabalhos científicos a desconsideração do intervalo de tempo que ocorre entre o término da construção de cada alteamento e o início do monitoramento de recalques em aterros reais. Essa diferença nos tempos se deve principalmente devido a problemas operacionais, pois dificilmente um novo alteamento de RSU pode ser construído, sem danificar a instrumentação já instalada em sua superfície. A não consideração desse fato pode levar a interpretações errôneas dos registros dos recalques. Este item tem como objetivo analisar essa influência, tendo como base os registros do monitoramento de recalques realizado no aterro sanitário de Belo Horizonte.

A Figura 5.1 apresenta a variação das deformações verticais ao longo do tempo dos medidores de recalques instalados na Célula AC-05, considerando apenas a data de início do monitoramento.



**Figura 5.1** - Deformações verticais específicas considerando o momento de início do monitoramento

A partir de uma extensa análise de registros operacionais foi elaborado um histórico mais detalhado dos resíduos sobre cada medidor, envolvendo a data e cota final de enchimento. Os resultados apresentados na Figura 5.1 foram revistos, a partir desse procedimento. A Figura 5.2 mostra os dados corrigidos.



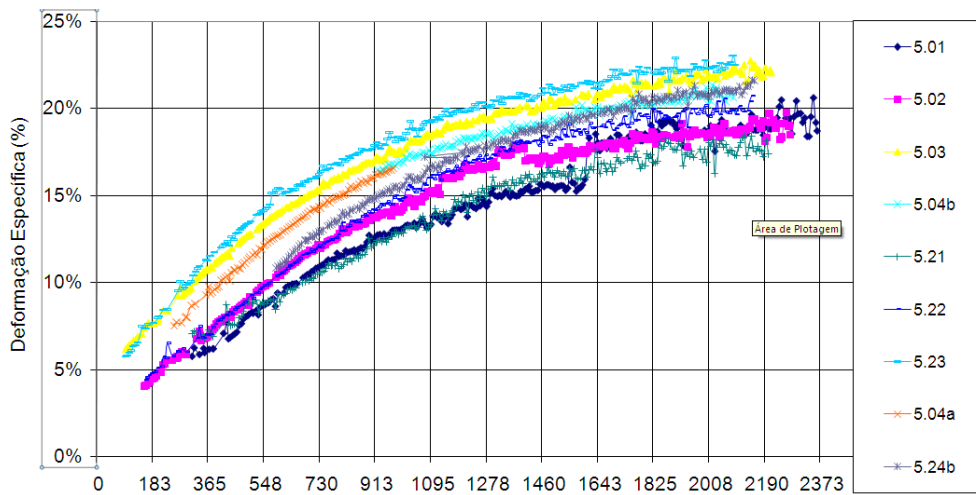
**Figura 5.2** - Deformações verticais específicas considerando o momento de construção dos alteamentos

Observa-se que o uso de dados brutos de monitoramento, sem efetuar a correção das cotas e da diferença de tempo entre o instante da construção e do início do monitoramento, fornece uma subestimação das deformações ocorridas no aterro.

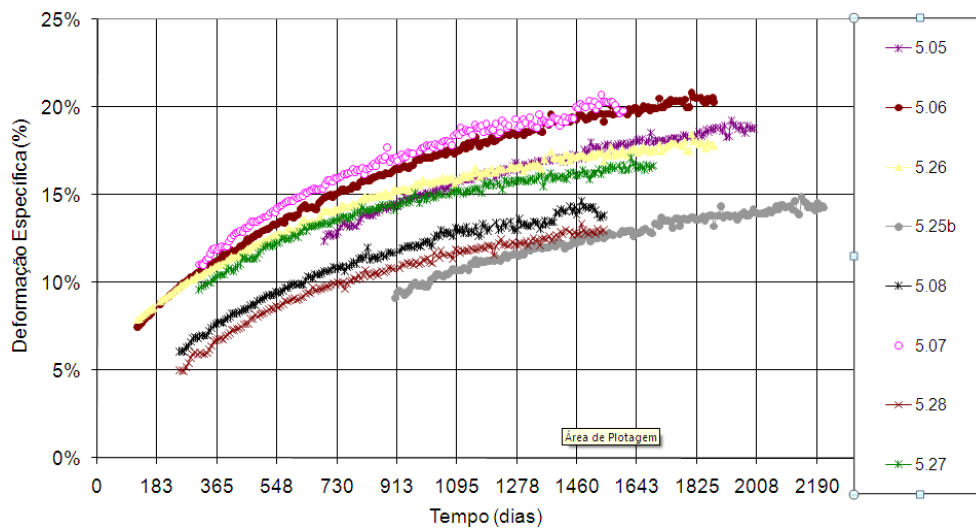
Além disso, a Figura 5.2 fornece uma faixa de variação dos valores (aproximadamente 10%) inferior à observada na Figura 5.1 (em torno de 15%). Embora essa faixa de variação das deformações ainda possa ser considerada grande, em torno de 10%, a interpretação sugere uma maior homogeneidade do comportamento dos resíduos. Isso se mostra coerente, pois a composição dos resíduos durante o enchimento da Célula AC-05 não teve alterações significativas. Esse comportamento mais homogêneo possibilita a calibração de modelos unidimensionais e bidimensionais, com menores intervalos de incerteza e a obtenção de parâmetros de deformabilidade com mais acurácia.

Considerando que a composição dos resíduos durante o enchimento da Célula AC-05 não teve alterações significativas e que os medidores são instalados na superfície, era de se esperar uma menor faixa de variação das deformações. No entanto, como uma parcela dos recalques se deve à biodegradação, a faixa de variação observada é coerente, pois as condições em que se encontram os resíduos sob cada medidor variam, gerando situações que podem influenciar a degradação dos mesmos. Fatores como eficiência do sistema de drenagem interna, teor de umidade, pH e temperatura afetam a magnitude e a velocidade dos recalques devidos à biodegradação.

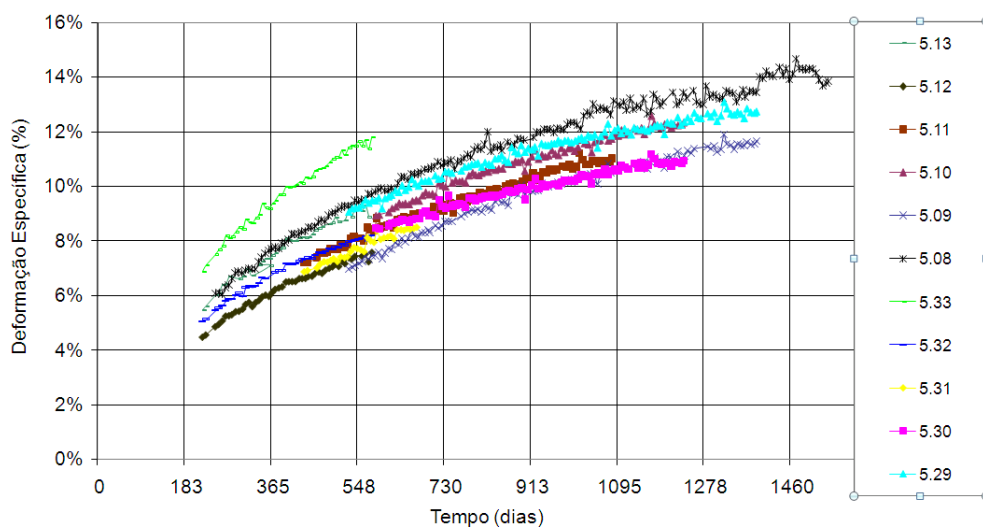
Pela simulação com o modelo hiperbólico, foram obtidas deformações específicas variando entre 6,0 e 11,3%, sendo as menores obtidas para as camadas com maiores cotas. Tal característica também é observada nos registros de monitoramento. Para visualizar isso, foram separados os 13 alteamentos em três grupos de camadas: da segunda até a quinta; da sexta até a nona e da décima à décima terceira. Com isso, foram gerados os gráficos das Figuras 5.3, 5.4 e 5.5.



**Figura 5.3 - Deformações específicas do agrupamento 1**



**Figura 5.4 - Deformações específicas do agrupamento 2**



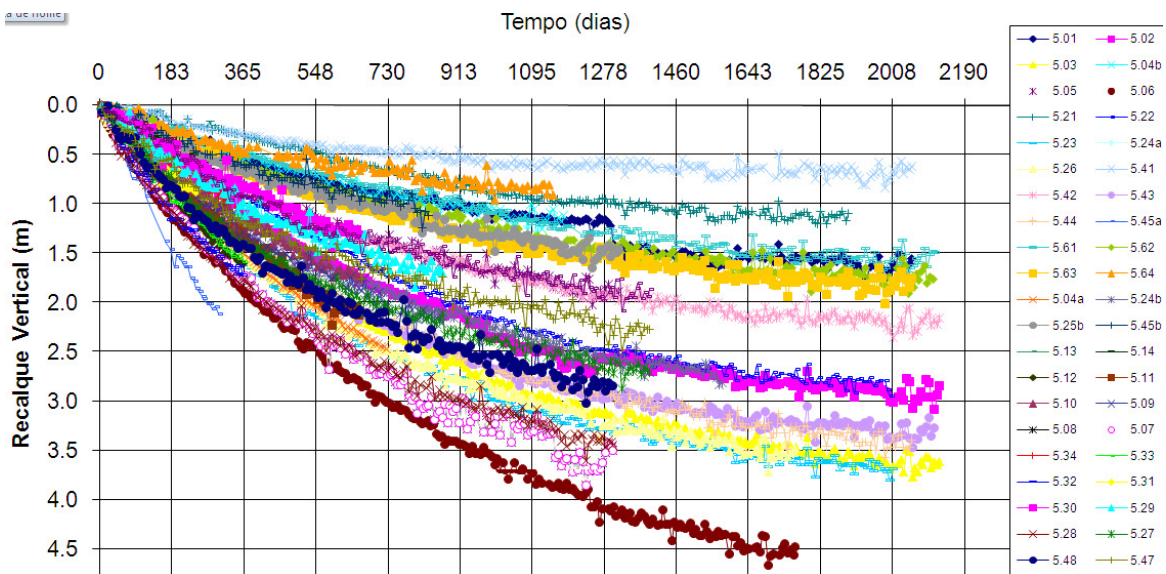
**Figura 5.5** – Deformações específicas do agrupamento 3

Conforme se pode observar, as deformações medidas nas placas de recalque dos alteamentos mais baixos variaram entre 16 e 23%, enquanto que no terceiro grupo, foram observados valores entre 11 e 15%. As medidas de deformações específicas verticais no modelo elástico-linear variaram entre 2,2 e 2,7%, representando um pequeno valor das simulações totais.

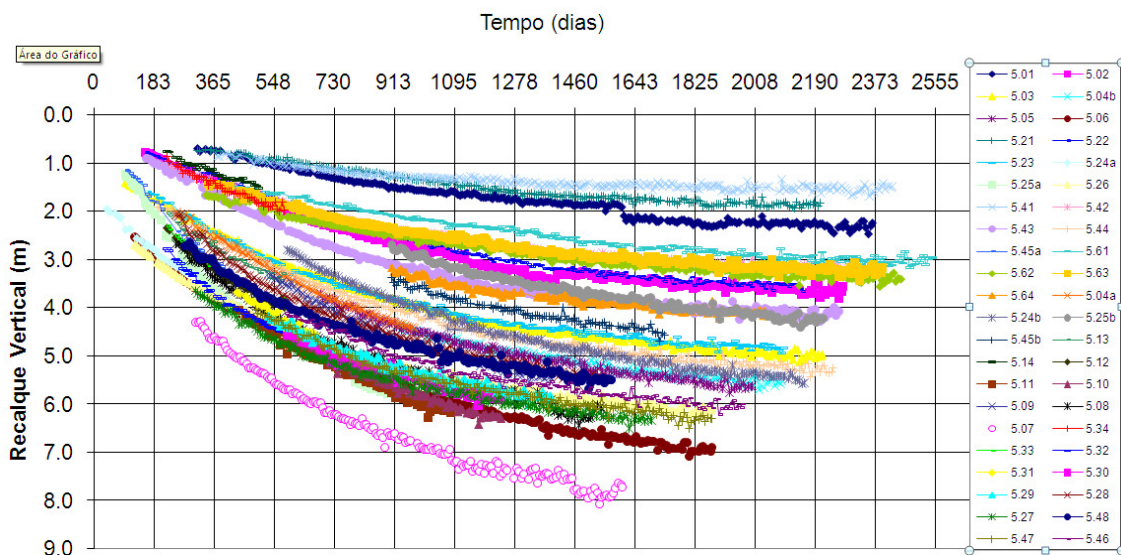
A maioria absoluta dos modelos que descrevem o comportamento dos RSU é unidimensional. Com isso, o cálculo das deformações específicas é feito pela divisão do recalque pela altura do maciço, logo abaixo do ponto que se está calculando. Esse procedimento foi feito para a obtenção dos dados das Figuras 5.6 e 5.7, bem como dos valores de 6,0 a 11,3%, do modelo hiperbólico. Ressalta-se que, para um modelo bidimensional elástico, são válidas as relações 3.9 até 3.14.

O mesmo procedimento usado para a criação das Figuras 5.1 e 5.2 foi usado para a geração das Figuras 5.6 e 5.7, que relacionam os deslocamentos verticais, tendo como pontos de referência o momento de construção dos alteamentos e de início de monitoramento de recalques.





**Figura 5.6** – Deslocamentos verticais a partir da data de início do monitoramento de recalques



**Figura 5.7** – Deslocamentos verticais a partir da construção dos alteamentos

Pela inspeção dessas figuras, observa-se que a maioria dos medidores está em processo de estabilização de seus valores. Além disso, observa-se-se que os menores deslocamentos verticais estão associados às placas localizadas nos primeiros alteamentos (PR 5.1, 5.21 e 5.41). Como existe menos resíduo entre a cota de instalação das placas de recalque e a base do aterro naquela abscissa, é de se esperar que os valores absolutos de deslocamentos verticais sejam menores (menos resíduo para se degradar e menos camadas sofrendo ação dos acréscimos de tensão vertical).

Ressalta-se que, mesmo tendo sido feito um levantamento detalhado do possível do histórico de enchimento da Célula AC-05, ele ainda está sujeito a erros. Pode-se se citar como fontes

potenciais de erro: os erros de leitura em campo; a substituição de placas de recalque danificadas em locais distintos dos originais, o registro pouco preciso do histórico de enchimento, que correlaciona a cota de enchimento com a respectiva data, dentre outros.

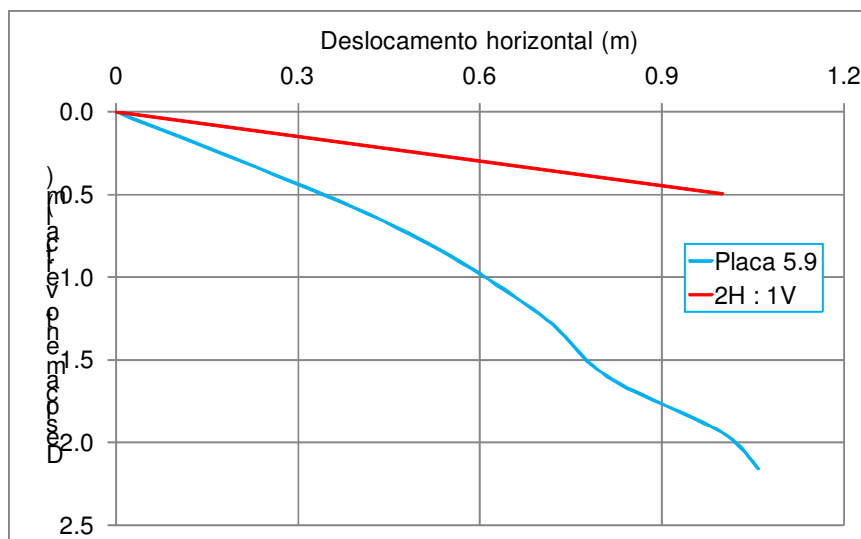
Caso estas informações estejam disponíveis com exatidão, outros estudos podem ser realizados com mais precisão, tais como correlações entre os recalques verticais e horizontais com a idade dos resíduos, análises estatísticas mais elaboradas, calibração de modelos 1D e 2D de previsão de recalques, dentre outros.

## **5.2 Análise conjunta das movimentações verticais e horizontais**

Para análise da estabilidade dos taludes dos aterros sanitários, são adotadas superfícies circulares de ruptura, sendo feito o cálculo do Fator de Segurança de cada uma das superfícies, usualmente com base no método das fatias, como o de Bishop. Sempre é importante se considerar o nível de lixiviados, dado a partir do cálculo do balanço hídrico no maciço.

A análise feita aqui é apenas em termos semi-quantitativos, comparando-se a inclinação da superfície de taludes na condição original, ou de final de construção, com a configuração deformada. A inclinação de projeto do aterro de Belo Horizonte era de 2H : 1V. Portanto, se houver um deslocamento inferior à inclinação 2H : 1V nos gráficos de deslocamento vertical x deslocamento horizontal, haverá superfícies mais inclinadas na configuração deformada do que na original.

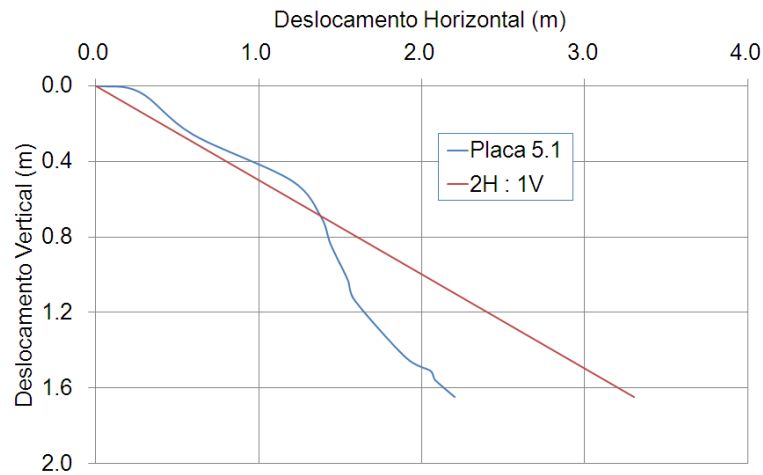
Com exceção de três placas, localizadas no segundo alteamento, próximas ao dique de partida (indicado como Rua Pampulha na Figura 4.3), todas as demais placas de recalque apresentaram padrões de movimentação em perfil sugerindo situações estáveis, tais como a Placa 5.9, cujos resultados são mostrados na Figura 5.8.



**Figura 5.8** - Deslocamento vertical x deslocamento horizontal da Placa 5.9

Um padrão não esperado foi observado nos instantes iniciais dos registros da Placa 5.1, localizada no segundo alteamento, conforme mostra a Figura 5.9. Embora esse padrão pudesse sugerir uma condição de instabilidade, o comportamento observado pode ser explicado, pois as placas situadas nas porções mais baixas do talude, próximas ao Dique de Partida (Rua Pampulha na Figura 4.3) tiveram influência da intensa movimentação de máquinas sobre o dique de partida durante o enchimento da célula. Outro fato que pode justificar esse comportamento são os possíveis erros de leitura, que se mostraram mais frequentes durante as fases iniciais de enchimento.

Os registros dos demais medidores são apresentados no Anexo 8.1 e foram gerados a partir da data de instalação dos medidores. Como se percebeu, há tendência de instabilidades no início da realização das leituras e, como parte da operação do aterro não foi monitorada, pode ser que essa observação tenha se estendido por um tempo maior do que o mostrado na Figura 5.9.

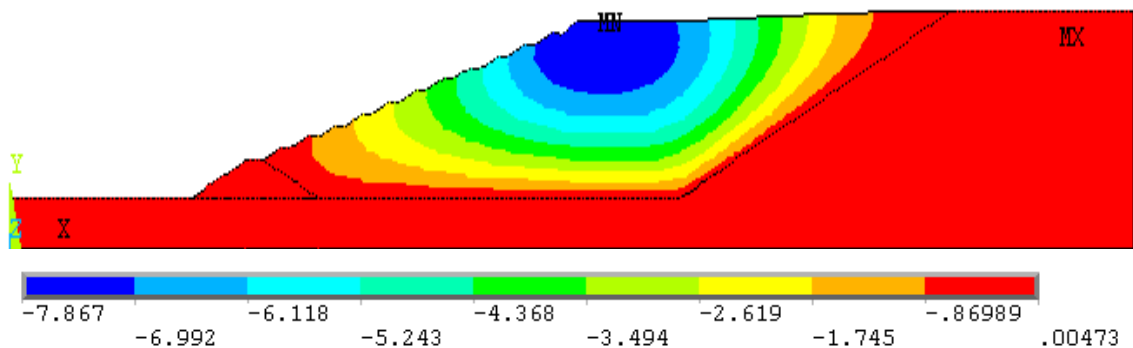


**Figura 5.9** – Gráfico deslocamento vertical x deslocamento horizontal da Placa 5.1

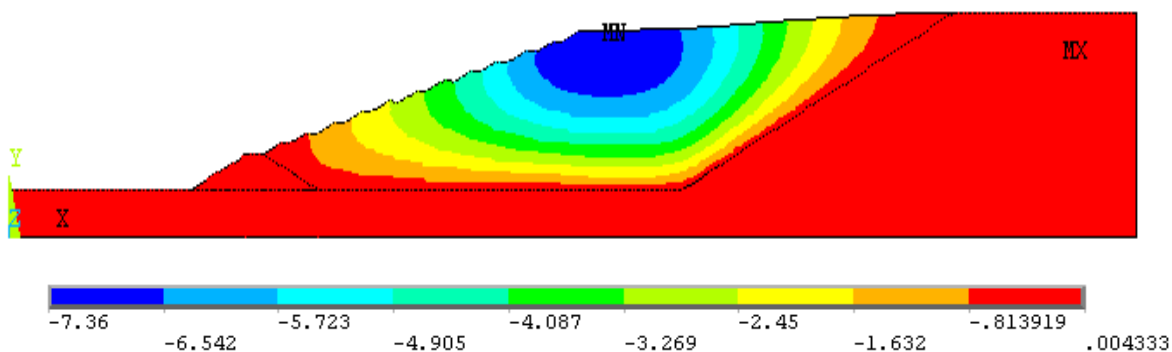
Simões *et al.* (2007) apresentaram análise semelhante para todas as células (AC-03, AC-04 e AC-05) do aterro sanitário de Belo Horizonte. A conclusão final foi semelhante, sendo a configuração inicial, correspondente ao final da construção, apenas sob o aspecto geométrico, menos estável do que a configuração deformada.

### **5.3 Influência dos regimes de pequenos e grandes deslocamentos**

A primeira análise numérica avaliou a diferença que os regimes de pequenos e grandes deslocamentos produzem nos recalques horizontais e verticais do aterro sanitário de Belo Horizonte, para modelos lineares elásticos utilizando o programa ANSYS. As Figuras 5.10 e 5.11 mostram os recalques verticais, para o regime de pequenos e de grandes deslocamentos. Em todas as figuras a partir do tópico 5.3, nesse capítulo, têm a representação dos deslocamentos em metros. Os valores positivos e negativos das abscissas e das ordenadas seguem a notação cartesiana.



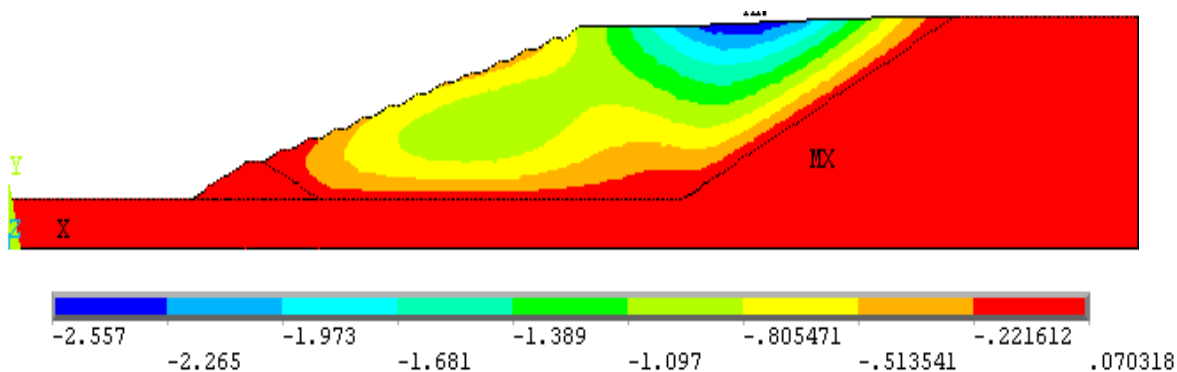
**Figura 5.10** – Recalques verticais no regime de pequenos deslocamentos



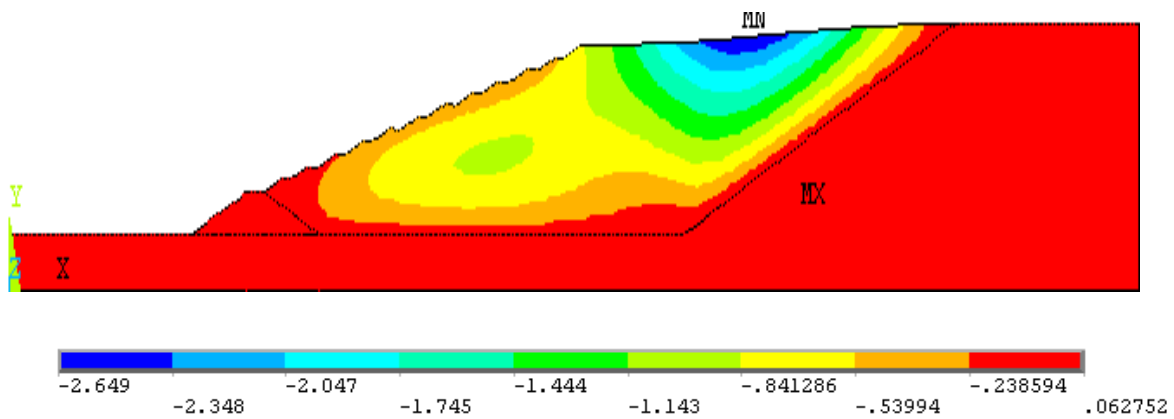
**Figura 5.11** – Recalques verticais no regime de grandes deslocamentos

Pela inspeção das Figuras 5.10 e 5.11, verifica-se que o formato dos recalques é bastante semelhante, com círculos concêntricos e valores próximos. O deslocamento vertical máximo produzido no regime de pequenos deslocamentos foi de 7,87 metros, enquanto no segundo modelo foi de 7,36 m. A diferença percentual foi de 7%, sendo apenas mais uma fonte de erros, de um modelo tão complexo e cheio de simplificações.

Os deslocamentos horizontais são reproduzidos nas Figuras 5.12 e 5.13. Nelas, verifica-se uma diferença percentual menor que 4%, o que intensifica a menor influência da adoção desse regime de deslocamentos x deformações para modelos lineares elásticos. Portanto, as diferenças apresentadas entre os dados de campo e os simulados têm pouca interferência da não consideração da não-linearidade geométrica por parte do programa.

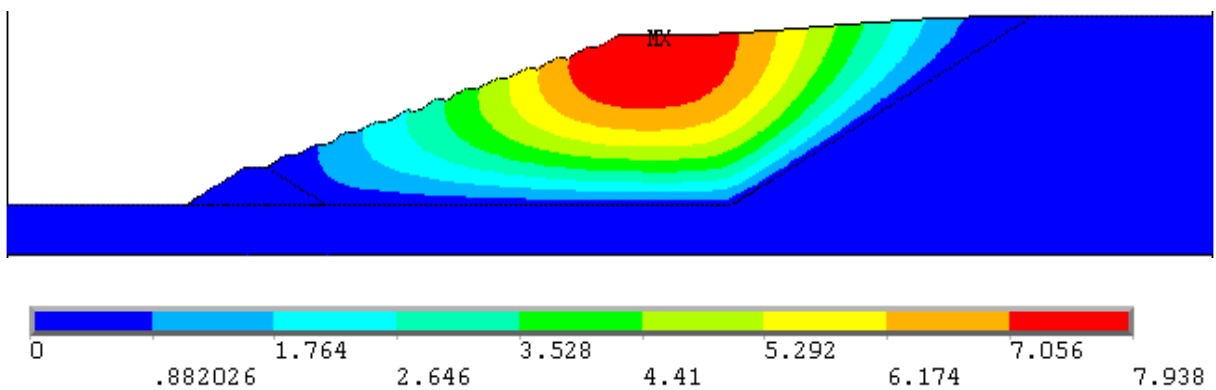


**Figura 5.12** – Recalques horizontais no regime de pequenos deslocamentos

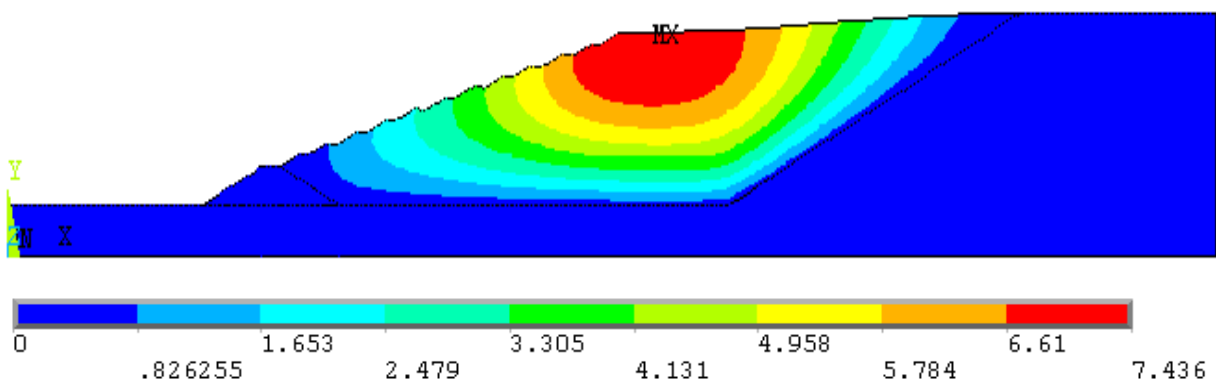


**Figura 5.13** – Recalques horizontais no regime de grandes deslocamentos

O vetor resultante dos deslocamentos, que tem como origem as componentes horizontais e verticais anteriormente apresentadas, foram sumarizadas na Figuras 5.14 e 5.15. Ainda são verificadas diferenças percentuais de apenas 7%, como as observadas nos deslocamentos verticais.



**Figura 5.14** – Vetor deslocamento resultante do regime de pequenos deslocamentos



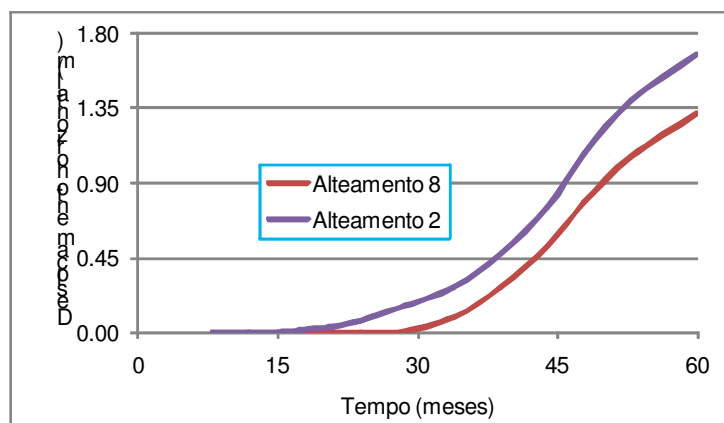
**Figura 5.15** – Vetor deslocamento resultante de regime de grandes deslocamentos

### 5.3.1 Aspectos preliminares dos deslocamentos horizontais e verticais

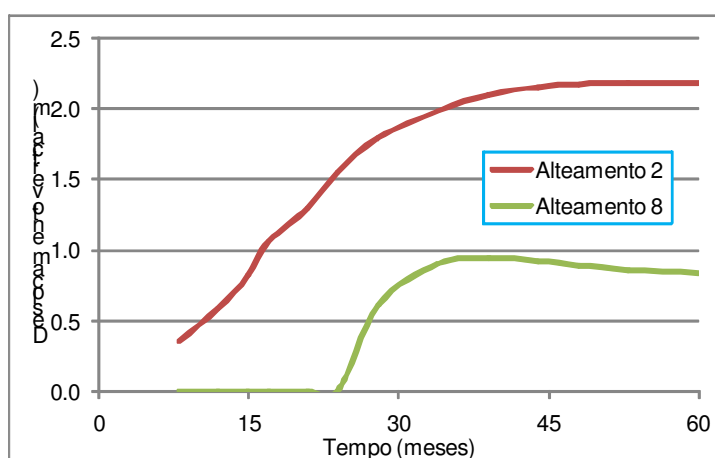
Busca-se nesse tópico, mostrar alguns aspectos importantes na interpretação dos valores simulados de deslocamentos nas direções x e y, nos modelos 2D adotados. Os recalques

horizontais têm valores crescentes em todos os incrementos de carga. Já os verticais, tendem à estabilização quase que imediata, sendo diretamente associado ao incremento de tensões. As Figuras 5.16 e 5.17 ilustram tais comportamentos.

Foram dois nós escolhidos, um localizado no topo da berma do oitavo alteamento e o segundo, na mesma abscissa que o primeiro nó, mas localizado na interface entre o primeiro e o segundo alteamentos.



**Figura 5.16** – Deslocamento horizontal de pontos genéricos do aterro



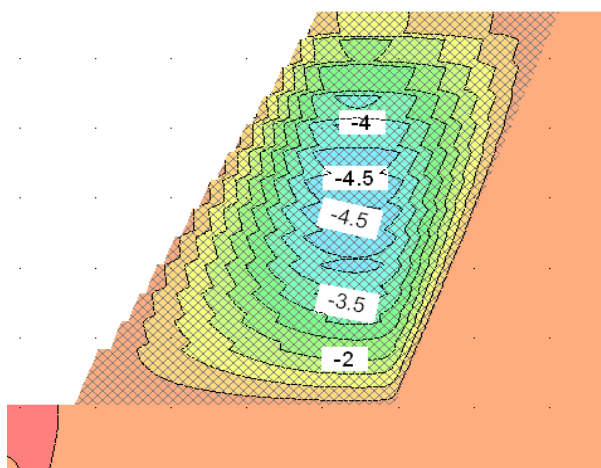
**Figura 5.17** – Deslocamento vertical de pontos genéricos do aterro

Os deslocamentos verticais, apresentados na Figura 5.15 têm uma tendência que depende da posição onde os nós escolhidos estão no aterro. O nó localizado no segundo alteamento tem incremento de tensão até o oitavo incremento de carregamento. Já o outro tem o aumento de tensões apenas na construção do oitavo incremento. Tal fato explica a estabilização dos recalques verticais simulados no oitavo incremento. Com isso, conclui-se que os pontos onde estão localizadas as placas de recalque sofrem basicamente a influência do peso próprio, quando se consideram os deslocamentos.

#### 5.4 Análises com o modelo elástico linear

As análises com o programa SIGMA/W foram realizadas adotando o regime de pequenos deslocamentos. Ele é caracterizado pela linearidade entre deformações e deslocamentos. Como o modelo linear elástico mantém a proporcionalidade entre as tensões e deformações, torna-se válido o princípio de superposição de efeitos. Com isso, conclui-se que a análise incremental no modelo elástico linear, nada interfere nos resultados finais. Isso pode ser visualizado quando se comparam os resultados de análises incrementais e com um incremento de carregamento único, obtidas com o programa ANSYS, quando não se aproveita a configuração deformada da camada anterior e se escolhe o regime de pequenos deslocamentos.

Outro ponto fundamental se refere à interpretação dos resultados dos dois programas. A Figura 5.18 ilustra uma análise incremental, com modelo elástico linear, realizada no programa SIGMA/W.



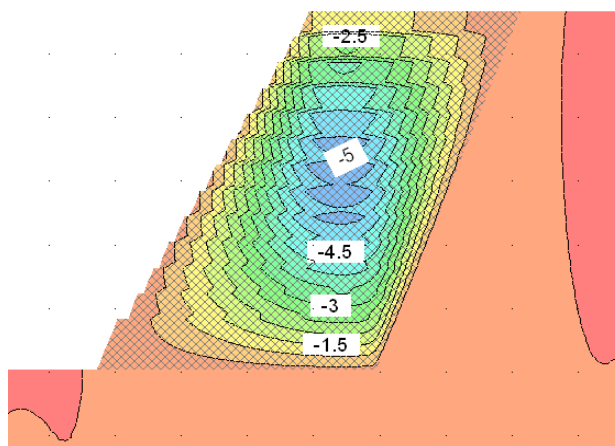
**Figura 5.18** – Recalques verticais em uma análise incremental com o modelo linear elástico sem ajuste de cotas

Um nó localizado no topo do quinto alteamento tem deslocamento apenas depois que for inserido o quinto incremento de carregamento. No programa ANSYS, quando se analisa entre a primeira e a quarta camadas, as que estão localizadas acima, se deslocam como corpos rígidos. Por isso, são computados recalques que não condizem à realidade, referentes aos nós imediatamente abaixo do que se está levando em questão.

Outro aspecto importante, diz respeito ao uso da opção de ajuste de cotas, já explicada no capítulo anterior. As Figuras 5.18 e 5.19 mostram os deslocamentos nodais verticais, sem e com o uso dessa opção, respectivamente. Pela análise comparativa entre as Figuras 5.7 e 5.8,



percebe-se uma pequena diferença entre os deslocamentos verticais, cerca de 0,50 m nos valores máximos. Obviamente, o ajuste de cotas coloca mais massa durante a simulação, gerando recalques mais elevados.



**Figura 5.19** – Recalques verticais numa análise incremental com o modelo linear elástico com ajuste de cotas

Os deslocamentos verticais simulados no modelo elástico foram muito baixos, quando comparados com os valores monitorados em campo. Tal fato é ilustrado pela Tabela 5.1, onde são mostrados os deslocamentos verticais no mês final de construção da célula AC-05.

**Tabela 5.1** – Percentual de recalques verticais elásticos

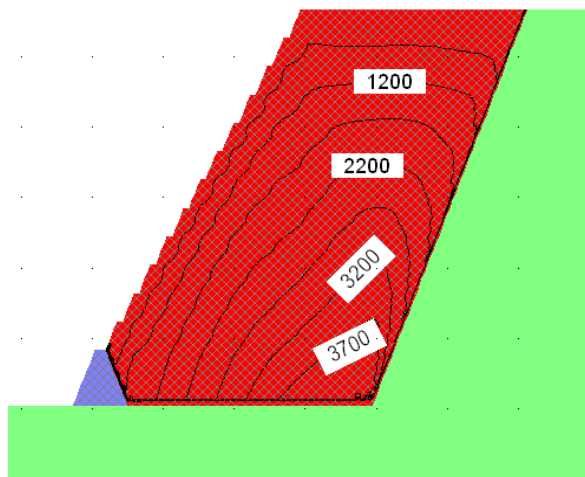
Placa	Deslocamentos verticais (m)		% Recalques elásticos
	Simulados	Reais	
5.1	0,28	1,87	14,97
5.2	0,44	3,40	12,94
5.3	0,57	4,44	12,84
5.4	0,72	4,89	14,72
5.5	0,86	4,78	17,99
5.6	1,02	5,87	17,38
5.7	1,17	6,40	18,28
5.8	1,34	4,61	29,07

Em média, os recalques verticais obtidos na simulação são 15% dos recalques medidos em campo. Esses valores são muito baixos porque o valor do módulo de elasticidade adotado (2,3 MPa) é alto para as regiões onde os medidores estão instalados, porque nesses pontos não há confinamento. O modelo hiperbólico pode vir como alternativa para suprimir tal aspecto.

É importante se ressaltar que o monitoramento das placas localizadas entre o décimo e o décimo terceiro alteamentos se iniciou depois de janeiro de 2006, período que coincide com o final de enchimento da célula AC-05.

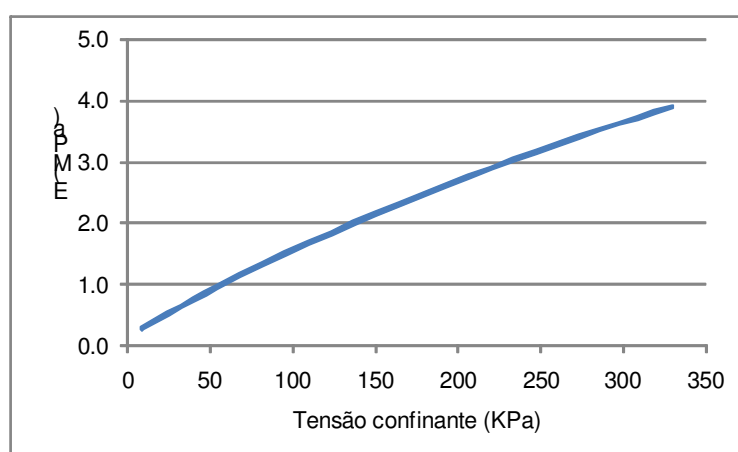
## 5.5 Modelo hiperbólico

O modelo hiperbólico é ideal para representar o aumento do módulo de elasticidade com o confinamento. A Figura 5.20 mostra os valores desses módulos, em uma simulação com 13 incrementos de carregamento e ajuste de cotas, utilizando o programa SIGMA/W.



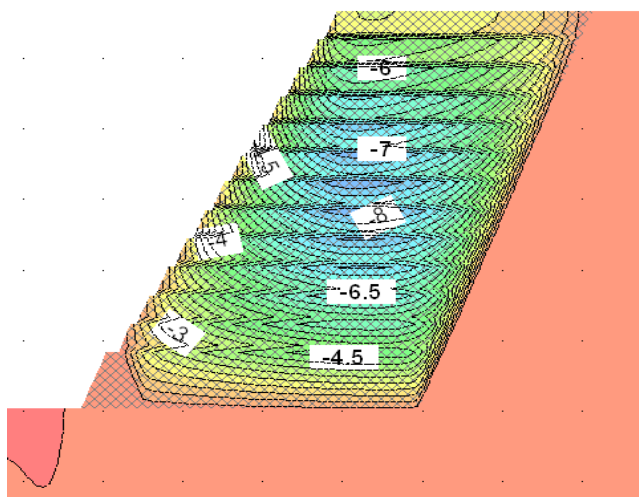
**Figura 5.20** – Módulos de Elasticidade (kPa) no último passo de carga

O valor máximo do módulo de elasticidade no incremento de carregamento 13 foi de 4200 kPa. A tensão horizontal máxima ( $\sigma_3$ ) foi de 350 kPa. Esses valores são condizentes com os obtidos na calibração do modelo hiperbólico. As isolinhas do módulo de elasticidade coincidem com a direção das isolinhas das tensões de confinamento. Escolhendo-se um nó no topo da camada 1, que sofre incrementos de tensão vertical em todos os passos de carga, pode-se visualizar o aumento do módulo de elasticidade com o confinamento (Figura 5.21).



**Figura 5.21** – Evolução do módulo de elasticidade com os incrementos de carregamento

A visualização dos recalques verticais no aterro sanitário, no final da construção da última camada, pode ser feita na Figura 5.22. Desta forma, é possível a comparação dos deslocamentos verticais com os obtidos na simulação elástica.



**Figura 5.22** – Deslocamentos verticais com o modelo hiperbólico

Os deslocamentos verticais são maiores no modelo hiperbólico em relação ao elástico. Isso acontece pelos recalques que acontecem nos primeiros incrementos de carga. Por exemplo, se for analisado apenas o primeiro incremento de carga, observa-se no modelo elástico, apenas 0,20 m de recalque, enquanto que os alcançados no hiperbólico chegam a 1,2 metros. Isso é explicado pelo módulo de elasticidade que é usado em baixas tensões confinantes, de 2,3 MPa no modelo elástico, e de valores menores que 1,0 MPa nas primeiras simulações do modelo hiperbólico. Embora ocorram simulações com valores de E maiores que 2,3 MPa em alguns elementos, para as últimas simulações, as diferenças observadas entre os deslocamentos proporcionados pelos mesmos modelos são inferiores aos observados nas simulações iniciais.

Após se ter uma visão geral dos deslocamentos elásticos, é interessante se comparar os deslocamentos pontuais obtidos no modelo hiperbólico com os dados reais da célula AC-05 do aterro de Belo Horizonte, no momento do final de seu enchimento. Esses valores podem ser visualizados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2** – Percentual de recalques elásticos no modelo hiperbólico

Placa	Deslocamentos verticais (m)		% Recalques elásticos
	Simulados	Reais	
5.1	1,41	1,87	75,40
5.2	1,86	3,40	54,71
5.3	2,21	4,44	49,77
5.4	2,49	4,89	50,92
5.5	2,72	4,78	56,90
5.6	2,93	5,87	49,91
5.7	3,13	6,40	48,91
5.8	3,30	4,61	71,58

Os deslocamentos elásticos são da ordem de 50% de todo o recalque medido, com exceção nas medidas das placas 5.1 e 5.8. Isso sugere que, quando avaliados pontualmente nos locais de instalação dos medidores de recalques (faces dos taludes), os resultados do modelo hiperbólico não se mostram satisfatórios, mostrando que mesmo durante a fase de enchimento, que no caso de estudo durou 5 anos, as parcelas devidas ao comportamento viscoso e biodegradação são relevantes.

### 5.6 Cálculo do volume útil

À medida que o aterro sanitário vai sendo construído, vão ocorrendo os recalques, que geram aumento do volume útil do mesmo. A cada alteamento, pode-se calcular o valor do volume que se ganha devido a essas movimentações do maciço. Esses valores podem ser obtidos em cada incremento de carga nas simulações com o programa SIGMA/W. Lá, são obtidos os valores das áreas deformadas em cada passo de carga, sendo transformada em volume, ao se considerar o estado plano de deformações e uma espessura unitária. A Tabela 5.3 mostra os valores dos recalques em área a cada incremento de carregamento, a soma dos mesmos e os percentuais associados.

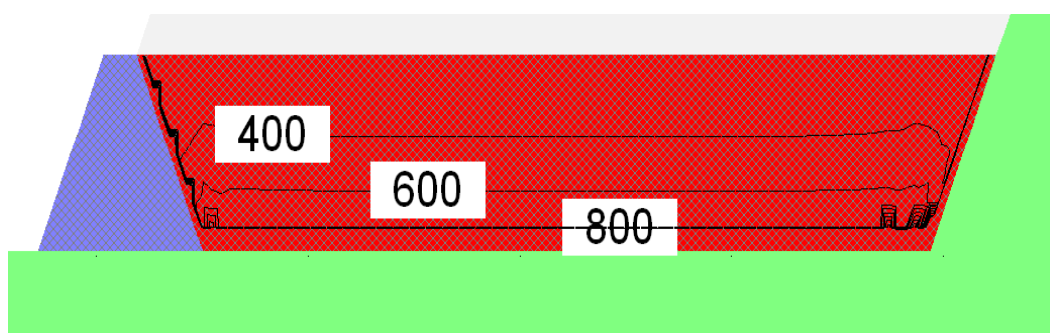
**Tabela 5.3 – Áreas úteis ganhas na Célula AC-05 durante o enchimento**

<b>Incremento</b>	<b>Recalques (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Soma Rec. (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>% Recalques</b>	<b>Soma Áreas (m<sup>2</sup>)</b>	<b>% Soma Recalques</b>
1	274	274	2400	11,42	2400	11,42
2	285	559	1300	21,92	3700	15,11
3	320	879	1275	25,10	4975	17,67
4	350	1229	1250	28,00	6225	19,74
5	372	1601	1225	30,37	7450	21,49
6	388	1989	1200	32,33	8650	22,99
7	402	2391	1175	34,21	9825	24,34
8	410	2801	1150	35,65	10975	25,52
9	415	3216	1125	36,89	12100	26,58
10	415	3631	1100	37,73	13200	27,51
11	412	4043	1075	38,33	14275	28,32
12	407	4450	1050	38,76	15325	29,04
13	400	4850	1025	39,02	16350	29,66

Na simulação com o modelo hiperbólico, os recalques na fase de enchimento da Célula AC-05 do aterro de Belo Horizonte corresponderam a aproximadamente 30% do volume de projeto. Conforme registros operacionais do aterro sanitário de Belo Horizonte, o volume de projeto para a célula AC-05 era de 1.989.000 m<sup>3</sup> e o volume realmente aterrado foi de 2.540.000 m<sup>3</sup>. O ganho de volume real resultante dos recalques da célula AC-05 durante seu

enchimento foi de 28% em relação ao volume inicial de projeto. Este valor está bem próximo aos valores obtidos na simulação com o modelo elástico não-linear.

Isso sugere a possibilidade de se utilizar, na fase de projeto, o modelo hiperbólico na estimativa preliminar do aumento de volume útil durante a fase de enchimento. Contudo, seu uso irrestrito não é recomendado, devido aos baixos valores de módulo de elasticidade para baixas tensões confinantes, como ocorre na região dos medidores. Jucá (1998) realizou ensaios de placa na superfície de um aterro de RSU, tendo obtido, por retroanálise o valor de  $E = 1,6 \text{ MPa}$ , para o resíduo com baixa tensão confinante sobre ele. Tal observação reflete diretamente sobre os deslocamentos verticais exacerbados que podem ser visualizados no meio do maciço com a simulação elástica não-linear. A Figura 5.23 mostra os baixos valores do módulo de elasticidade, na primeira etapa da fase de solução.



**Figura 5.23** – Módulo de Elasticidade (kPa) no primeiro incremento de carregamento

É interessante observar a evolução dos recalques a cada incremento de carregamento. A conformação da geometria do aterro é bastante regular, sendo o primeiro alteamento o maior deles, com 10 metros e os restantes, com 5 m. Tal fato, explica que o percentual de recalques obtidos no primeiro incremento de carregamento foi de apenas 11,4%, enquanto que nos restantes, foram obtidos valores bastante próximos e crescentes. O valor menos elevado do recalque no primeiro passo de carga é explicado por ser a camada mais espessa, apresentando, portanto, uma tensão confinante mais elevada e, um módulo de elasticidade maior, por consequência.

O cálculo do volume útil também foi realizado para o modelo elástico-linear. Os resultados foram bem menores que os obtidos com o modelo hiperbólico. O volume útil ganho durante a operação do aterro foi de apenas 9%, bem abaixo dos 28% reais. Isso ocorre porque se realiza a simulação de todo aterro, desde os primeiros incrementos de carregamento, com 2,3 MPa. Esse valor é razoável apenas na última simulação, quando o valor do módulo de elasticidade

representa um valor médio de todos os módulos. A Tabela 5.4 mostra os recalques em cada incremento de carga da simulação com o modelo elástico linear.

**Tabela 5.4 – Áreas úteis ganhas na Célula AC-05 durante o enchimento (elástico linear)**

<b>Incremento</b>	<b>Recalques (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Soma Rec. (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>% Recalques</b>	<b>Soma Áreas (m<sup>2</sup>)</b>	<b>% Soma Recalques</b>
1	44	44	2400	1,96	2400	1,83
2	50	94	1300	3,85	3700	2,54
3	65	159	1275	5,10	4975	3,20
4	80	239	1250	6,40	6225	3,84
5	94	333	1225	7,67	7450	4,47
6	108	441	1200	9,00	8650	5,10
7	122	563	1175	10,38	9825	5,73
8	134	697	1150	11,65	10975	6,35
9	145	842	1125	12,89	12100	6,96
10	154	996	1100	14,00	13200	7,55
11	163	1159	1075	15,16	14275	8,12
12	171	1330	1050	16,29	15325	8,68
13	179	1509	1025	17,46	16350	9,23

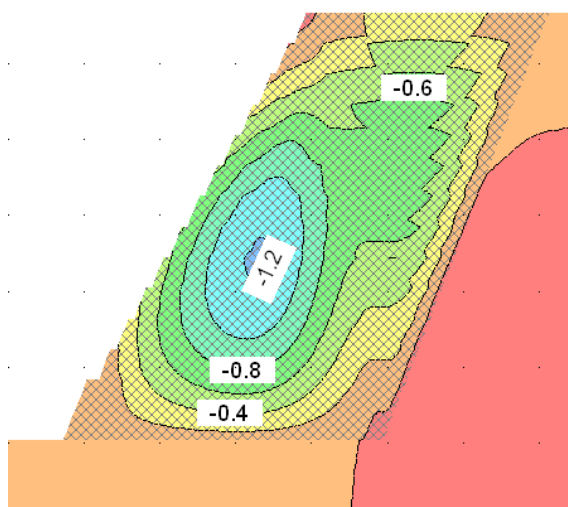
## **5.7 Deslocamentos horizontais**

Os recalques horizontais foram maiores no modelo hiperbólico em relação ao elástico linear e a explicação para esse fato está no módulo de elasticidade das simulações iniciais, como explicado no item 5.3. Isso pode ser comprovado pelas equações 3.9 a 3.11. Como as tensões e o coeficiente de Poisson são praticamente os mesmos, apenas o módulo de elasticidade é quem determina as deformações e, os consequentes deslocamentos, nesse caso. No conjunto de dados que gerou a calibração para o modelo hiperbólico foi utilizado um coeficiente de Poisson de 0,30.

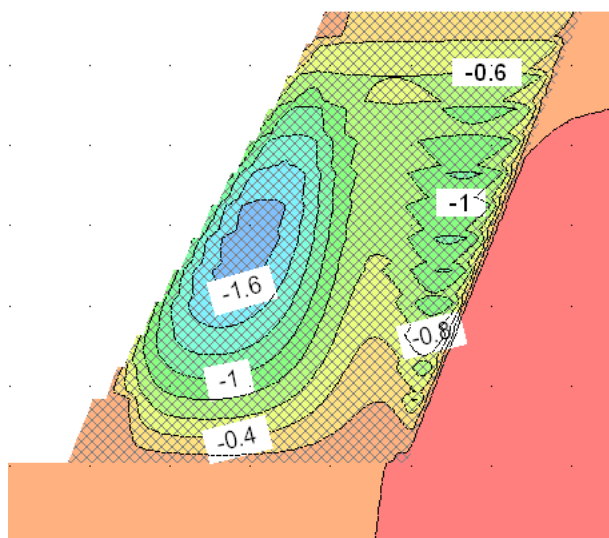
A Tabela 5.5 e as Figuras 5.24 e 5.25 mostram os deslocamentos horizontais obtidos no modelo elástico linear e hiperbólico. Os valores máximos obtidos foram de 1,6 e de 1,2 metros, nos modelos elásticos não-linear e lineares, respectivamente.

**Tabela 5.5** – Comparação entre deslocamentos horizontais obtidos com o modelo elástico linear e hiperbólico.

Placa	Deslocamentos horizontais (m)	
	Elástico	Hiperbólico
5.1	0,21	0,46
5.2	0,39	0,85
5.3	0,54	1,10
5.4	0,65	1,27
5.5	0,72	1,36
5.6	0,73	1,37
5.7	0,69	1,31
5.8	0,58	1,16
5.9	0,42	0,95
5.10	0,25	0,69



**Figura 5.24** – Deslocamentos horizontais com o modelo elástico



**Figura 5.25** – Deslocamentos horizontais com o modelo hiperbólico

A comparação dos recalques horizontais simulados com os obtidos nos dados de monitoramento é delicada. Como existe um intervalo de tempo entre a construção dos

alteamentos e o início do monitoramento, os recalques horizontais que ocorreram durante esse intervalo de tempo não puderam ser recuperados.

As figuras apresentadas no Anexo 8.3 mostram a evolução dos deslocamentos horizontais ao longo do tempo, monitorados na célula AC-05. A grande maioria deles também apresenta tendência à estabilização, até em alguns medidores instalados em camadas mais superficiais (de menor idade). As placas paralelas entre si apresentaram perfis de deslocamento semelhantes na maioria delas. As diferenças apresentadas entre elas ocorrem devido às heterogeneidades inerentes ao comportamento dos RSU.

Com a não utilização do procedimento adotado na avaliação dos deslocamentos verticais (ajuste de datas e cotas entre a construção das camadas e instalação dos medidores), há a subestimação dos deslocamentos horizontais apresentados pelo aterro. Logo, pode-se dizer que a estabilização dos resíduos mais antigos ocorre em valores maiores ou iguais à 2,0 metros. Já nos resíduos mais novos nada pode ser inferido, por eles não terem chegado à estabilização.

### ***5.8 Calibração do modelo unidimensional***

O modelo unidimensional de Simões (2000) foi usado para ajustar os dados simulados com os monitorados. O Anexo 8.2 apresenta as curvas obtidas, que, de uma forma geral, apresentaram um bom ajuste.

A principal fonte de erro encontrada no levantamento dos dados no histórico de enchimento da célula AC-05 foi correlacionar de maneira correta a cota de projeto com a data de construção do alteamento. Para tal, a data de instalação das placas de recalque e início do monitoramento foi colocada como o tempo zero, eliminando tal interferência. Contudo, durante a simulação, foi simulado o momento exato da construção de todos os alteamentos. Como o instante considerado como zero nas simulações não foi o do momento da instalação das placas de recalque; desprezaram-se os recalques entre o tempo de construção do alteamento e o instante em que a placa de recalques iniciou o monitoramento.

Duas fontes de erro desse modelo são a impossibilidade de se entrar com o tempo de execução da cada um dos alteamentos; isto é, imagina-se que o instante entre o início da construção do alteamento e o momento em que se alcança o topo da mesma, coincide. Além disso, o modelo não leva em consideração o preenchimento de cada uma das camadas com



resíduo, durante a execução das mesmas, propiciado pelos recalques ao longo do tempo. Ou seja, não há a opção ajuste de cotas do programa SIGMA/W implementada nesse modelo.

Ainda no Anexo 8.2, é importante explicar que nem sempre o momento de instalação das placas situadas dentro da mesma camada é coincidente. Com isso, foram gerados gráficos distintos para cada uma delas. Quando o momento de ambas coincide, elas foram colocadas em um mesmo gráfico.

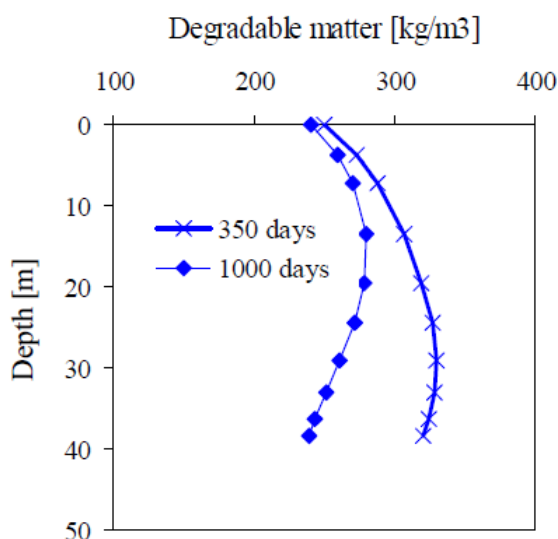
O ponto final do monitoramento de cada uma das placas é o que foi usado para calibrar o modelo unidimensional, sendo apresentados os pontos de monitoramento e os simulados em cada uma das placas na Tabela 5.5.

**Tabela 5.6 – Deslocamentos verticais obtidos na simulação 1D**

Placa de recalque	Recalque vertical (m)		Diferença (%)
	Simulado	Monitorado	
5.1	1,93	1,62	19,14
5.2	2,92	3,00	-2,67
5.3	3,81	3,66	4,10
5.4	1,20	1,11	7,50
5.5	1,65	1,90	-13,16
5.6	5,09	4,49	13,36
5.7	3,65	3,50	4,29
5.8	3,88	3,50	10,86
5.9	2,21	2,21	0,00
5.10	1,69	1,76	-3,98
5.11	2,07	2,13	-2,82
5.12	1,63	1,40	16,43
5.13	1,63	1,17	39,32
5.21	1,93	1,10	75,45
5.22	2,92	2,94	-0,68
5.23	3,81	3,69	3,25
5.24	2,07	2,67	-22,47
5.25	1,15	1,46	-21,23
5.26	5,09	3,48	46,26
5.27	3,65	2,61	39,85
5.28	3,88	3,45	12,46
5.29	2,21	1,69	30,77
5.30	1,69	1,32	28,03
5.31	0,99	0,88	12,50
5.32	1,63	1,49	9,40
5.33	1,63	1,43	13,99

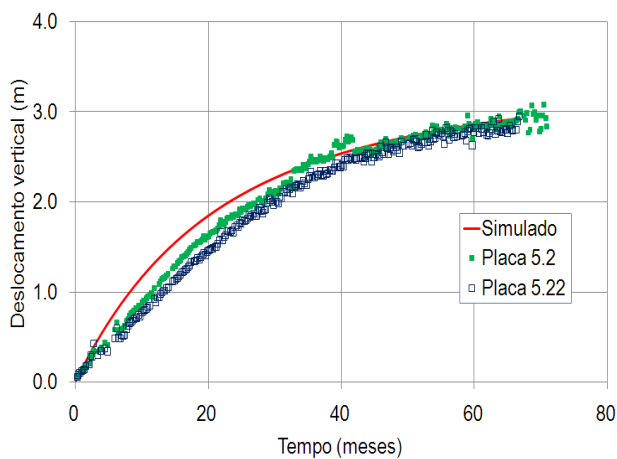
Em geral, os valores simulados são superiores aos medidos. Essa diferença aumentaria um pouco, em virtude da opção de ajuste de cotas, o que ocasionaria uma redução pequena nos parâmetros obtidos. Pontualmente, alguns resultados são ruins, com diferenças percentuais superiores a 30% (em 6 medidores). Como são 28 placas instaladas, considera-se satisfatório o resultado obtido.

A biodegradabilidade potencial (BP) calibrada foi de 50% nos vinte primeiros metros, de 60% em 30 metros e de 50% nos vinte mais profundos. O aumento da biodegradabilidade potencial condiz com a Figura 5.26, publicada no trabalho de McDougall (2009). Nele, foi feita a aplicação de seu modelo em uma coluna de 40 metros de profundidade. Nos primeiros 350 dias, apenas se aplicou o carregamento. Depois disso, avaliou-se o início da biodegradação, até se simular os 1000 dias de deposição do resíduo. Conforme pode ser visualizado, houve uma redução maior do teor matéria degradável a partir dos 20 metros de profundidade, conforme feito com a BP nas simulações.

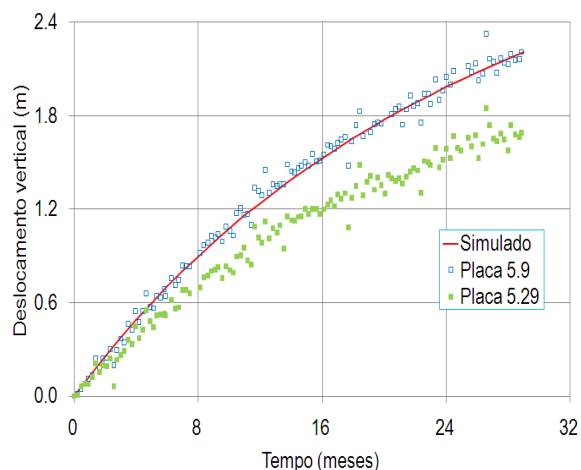


**Figura 5.26** – Degradabilidade potencial em função da profundidade (McDougall, 2009)

Em geral, as simulações foram feitas até no início do ano de 2008, data em que se encontram mais consistentes os dados de monitoramento. De certa forma, os resíduos mais antigos já apresentavam uma tendência à estabilização e, resíduos mais novos, ainda não. Pela inspeção dos gráficos do Anexo 8.2 pode-se notar isso. As Figuras 5.27 e 5.28 mostram com clareza tal diferença.

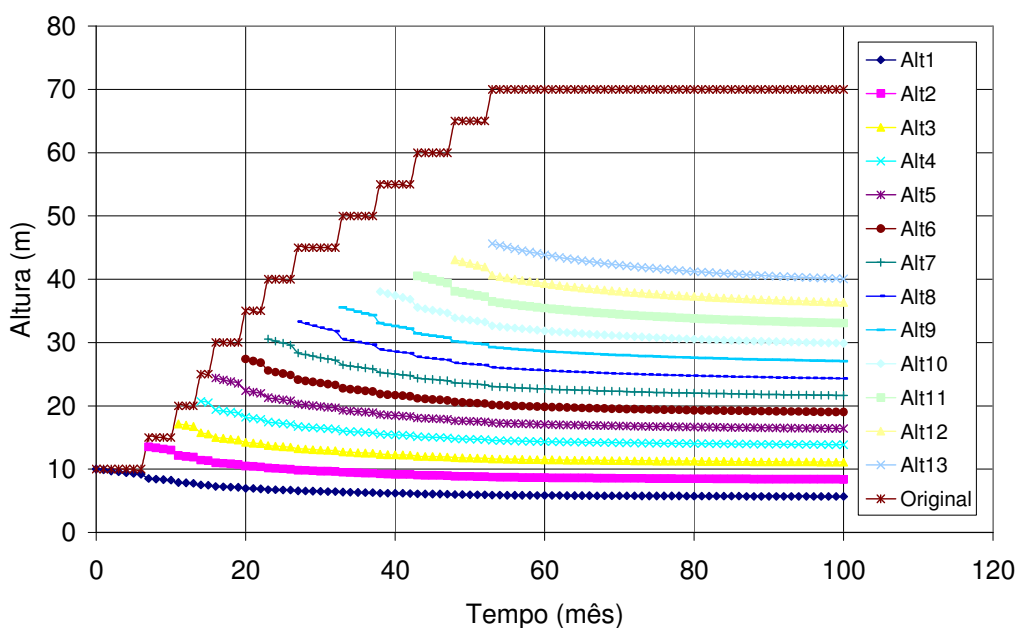


**Figura 5.27** – Estabilização dos deslocamentos verticais



**Figura 5.28** – Perfil crescente dos recalques verticais

Para a obtenção das curvas de deslocamento vertical ao longo do tempo no modelo acoplado mecânico-biológico, foram feitas 13 simulações diferentes. Cada uma tem uma quantidade diferente de alteamentos, sendo feita a leitura dos deslocamentos no topo de cada um deles. Na Figura 5.29, é possível visualizar a evolução da altura de cada uma das camadas localizadas sob os medidores de recalque instalados no topo da célula.

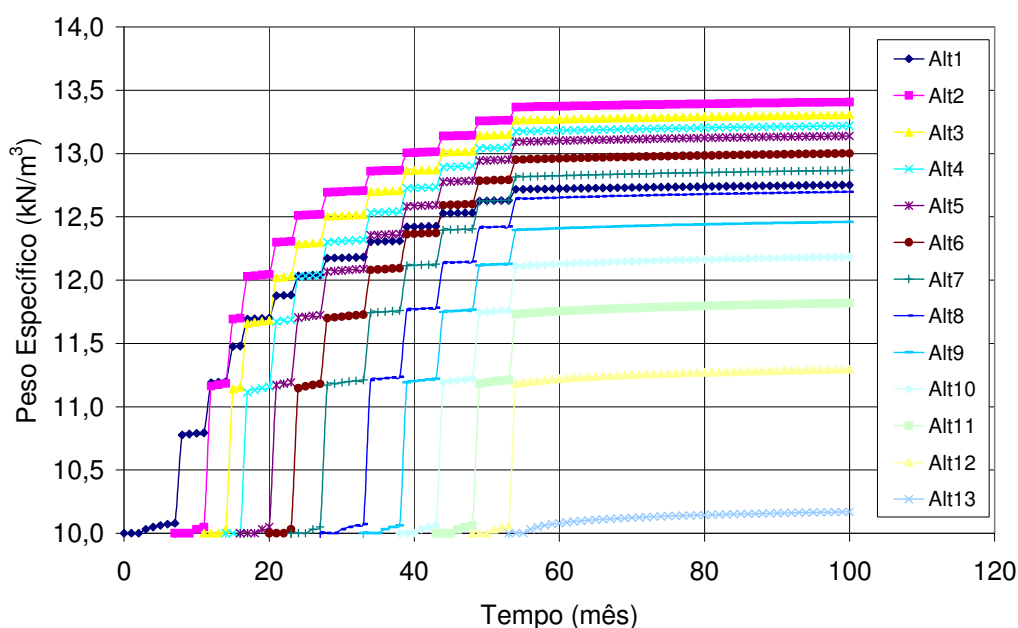


**Figura 5.29** – Evolução da altura do aterro

Outro resultado que pode ser inferido na aplicação do programa, diz respeito à evolução do peso específico com o tempo. Vinte e cinco meses após a construção do último alteamento da célula AC-05 (data que coincide com o final do monitoramento), o peso específico cresceu

aproximadamente 30%, chegando a  $13,40 \text{ kN/m}^3$  nas camadas iniciais, conforme pode ser visualizado na Figura 5.30.

Carvalho (1999) faz medições de pesos específicos no aterro Bandeirantes, com base em amostras retiradas com auxílio de trados mecânicos. Ela obteve em suas medições, valores próximos de  $14 \text{ kN/m}^3$ , em profundidades próximas à 20 metros, nos dois locais aonde foram extraídos os RSU. McDougall (2009) desenvolveu uma formulação do aumento dos pesos específicos com a profundidade. Para condições médias de compactação, chegam-se aos valores obtidos nas simulações.



**Figura 5.30** – Evolução dos pesos específicos dos alteamentos

### 5.8.1 Cálculo do volume útil ganho

Com base na metodologia apresentada no item 4.5.1, chegou-se que o valor da área de aterramento ganha em função dos recalques foi de  $5500 \text{ m}^2$ . Em valores percentuais, esse incremento chega a 33%, se comparado com a área de projeto simulada. Embora seja 5% maior que os valores reais obtidos em campo, esse resultado pode ser considerado representativo. Além de o erro percentual ter sido pequeno, o desenho feito exacerba a área ganha. A abscissa de todos os pontos foi mantida igual. Contudo, o aterro se desloca em toda a sua totalidade para o lado esquerdo. Ou seja, a área obtida seria de fato um pouco menor do que o valor calculado.

## 6 CONCLUSÕES

A análise dos registros de monitoramento geotécnico de recalques permite algumas conclusões relativas à estabilidade de taludes, sob o ponto de vista geométrico. O padrão de deslocamentos, horizontais e verticais, observado no conjunto de 40 medidores instalados na célula AC-05 do Aterro Sanitário de Belo Horizonte, indica reduções significativas dos volumes de resíduos dispostos e sugerem que as movimentações não se figuram como indicativos de problemas de estabilidade geotécnica. Eventualmente, e normalmente associadas a medidores instalados em regiões com intenso tráfego de máquinas durante a operação, padrões sugerindo problemas de instabilidade foram observados. Este fato reforça que a interpretação desses registros deve ser feita com cautela, avaliando as possíveis interferências da operação com o monitoramento. Um segundo ponto está relacionado à correção do período que transcorre entre a construção dos alteamentos e o início do monitoramento de recalques. Quando esse intervalo de tempo foi considerado, percebeu-se, para os registros da célula AC-05, um comportamento mais uniforme em relação às deformações verticais específicas. Como a grande maioria dos deslocamentos verticais já está tendendo à estabilização, conclui-se que dentro de um mesmo aterro, o comportamento dos RSU deve ficar em uma faixa de deformações verticais não muito alongada. Com isso, podem-se obter parâmetros de deformabilidade com faixas de variação bem menores, caso sejam feitas retroanálises dos registros de monitoramento, considerando modelos 1D, 2D ou 3D.

A calibração unidimensional feita durante o trabalho permite também algumas observações. Além da boa correlação obtida nas curvas de deslocamentos verticais, tem-se que o ganho de volume útil devido aos recalques também pode ser muito bem estimado. Apesar do modelo acoplado mecânico-biológico de Simões (2000) não simular os deslocamentos horizontais, a diferença entre os volumes ganhos durante a fase de enchimento foi de apenas 5%. O ganho de volume, proveniente da simulação foi de 33%, enquanto que nos dados de campo foi de 28%. Esses resultados poderiam ser melhorados, caso fossem adotadas técnicas de otimização, para calibração do modelo.

Com relação às simulações numéricas bidimensionais, algumas considerações podem ser feitas. Inicialmente, pode-se dizer que o regime de pequenos deslocamentos não influenciou de forma significativa nos resultados obtidos pelos modelos elásticos lineares. O uso de modelos elásticos lineares resultou em valores muito baixos de recalques horizontais, verticais e volumes úteis ganhos durante a fase de enchimento. Os deslocamentos verticais

representaram apenas 15% dos valores obtidos nas medições de campo. Comparando-se com os recalques imediatos obtidos no modelo de Simões (2000), os valores relacionados à CR representaram 25% dos valores totais de deslocamentos verticais. Os deslocamentos horizontais foram cerca de 40% dos obtidos no modelo hiperbólico. O ganho de volume útil foi apenas 30% dos valores reais. O modelo hiperbólico apresentou resultados melhores: os deslocamentos verticais foram cerca de 50% dos totais medidos em campo, o que implica uma grande influência das parcelas dependentes do tempo, desconsideradas nas simulações realizadas; os volumes úteis ganhos, obtidos no modelo hiperbólico, foram de 30%, valores muito próximos do valor real, de 28%. O modelo hiperbólico pode ser bom para uma primeira estimativa preliminar da vida útil de aterros sanitários, na fase de projeto. Contudo, o uso do modelo hiperbólico como estimativa de vida útil não pode ser usado de maneira irrestrita, pelos baixos valores dos módulos de elasticidade em locais com baixas tensões confinantes.

## 7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento do trabalho, tanto durante a revisão da literatura quanto pelas tentativas que não foram possíveis de serem realizadas, há recomendações que podem ser feitas, para o desenvolvimento de trabalhos futuros. As propostas que se fazem são as seguintes:

- Implementação computacional e melhoria do modelo tridimensional desenvolvido por Machado *et al.* (2008), seja pela redução do número de parâmetros, seja pela melhoria da reprodução dos resultados das curvas  $\epsilon_a \times \epsilon_v$ ;
- Uso do modelo curve-fitting (visco-elástico) do programa ANSYS, para tentar representar a parcela dependente do tempo, associada com modelos que descrevam a porção elástica dos recalques (hiperbólico);
- Realização de ensaios de placa para tentar reproduzir carregamentos em RSU e obter mais parâmetros de compressibilidade para os resíduos;
- Realização de retroanálise de dados de monitoramento para obtenção dos parâmetros de RSU, em diferentes modelos constitutivos;
- Simulação de situações reais com o modelo desenvolvido por McDougall (2007) e comparação com os valores medidos em campo;
- Realização de estudos com os registros de monitoramento de recalques, tais como a validação de modelos bidimensionais para a previsão de recalques futuros, a realização de estudos estatísticos mais elaborados, dentre outros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRES, A.D.B. *Estudo tensão-deformação da barragem de Irapé*. 2006. 167p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2006.
- BENVENUTO, C.; CUNHA, M.A. Escorregamento em massa de lixo no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo. In: *Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos*, 2. 1991, Rio de Janeiro: ABMS, v. 2, p. 55–66.
- CARVALHO, M.F.; MACHADO, S.L. e NASCIMENTO, J.F.C. Estudo do Efeito do Envelhecimento na Compressibilidade de amostras de resíduo sólido urbano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13. 2006, Curitiba. *XIII COBRAMSEG*, 2006. v3. p.1413-1418.
- CATAPRETA, C.A.A.; BATISTA, H.P. e LAMOUNIER, A.C.C. O aterro sanitário e a concessão dos serviços públicos de destinação final de resíduos sólidos. *Revista Pensar BH*. Belo Horizonte, ed.1, 2002.
- CATAPRETA, C.A.A. *Comportamento de um aterro sanitário experimental*. 2008. 316 p. Tese (Doutorado em Saneamento) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- CATAPRETA, C.A.A. e SIMÕES, G. F. Monitoramento Ambiental, Operacional e Geotécnico de Aterros Sanitários. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL E V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSINTÉTICOS, 2007, Recife. *Anais do VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental e V Simpósio Brasileiro de Geossintéticos*, 2007. Recife : ABMS, 2007. p. 1-8.
- CEPOLLINA, M.; KAIMOTO, L. S. A.; MOTIDOME, M. J. e LEITE, E. F. Monitoramento em aterros sanitários durante a operação: desempenho mecânico e ambiental. In: *Seminários sobre Resíduos Sólidos*, 2004. São Paulo: ABGE, 2004.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente (2005) – Resolução Nº 357. Brasília.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente (1990) – Resolução Nº 01. Brasília.
- DUNCAN, J.M.B. e CHANG, C.Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of Soils and Foundation Division, ASCE*. v.96. no.SM5, 1970.
- EL-FADEL M.; SHAZAK, L.; SALIBY, E. e LECKIE, J. Comparative assessment of settlement for solid waste applications. *Waste Manage Resource*, v.17, n.5. p 347-368. 1999.
- FILHO, A.A. *Elementos finitos: A base da tecnologia CAE*. São Paulo: Editora Ética. 2000. 292 p.
- GIBSON, R.E.; LO, K.Y. A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression. *Acta Polytechnica Scandanavica*, C.10., n.296, p.1-16. 1996.
- GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q. Geotechnical characterization of municipal solid waste: Choice of Design Parameters. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 2., 1996, Osaka. *Proceedings...* Osaka, 1996.
- HEISS-ZIEGLER C. e FEHRER K. Geotechnical behavior of mechanically – biologically pré-treated municipal solid waste (MSW). In: NINETY INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT LANDFILL SYMPOSIUM, 2003. Cagliari, Italia. *Proceedings Sardinia: S, Margherita di Pula*, 2003.

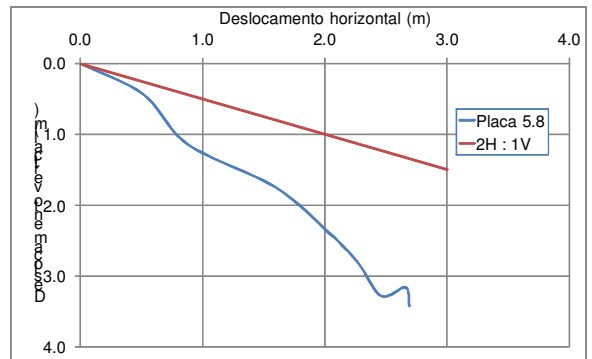
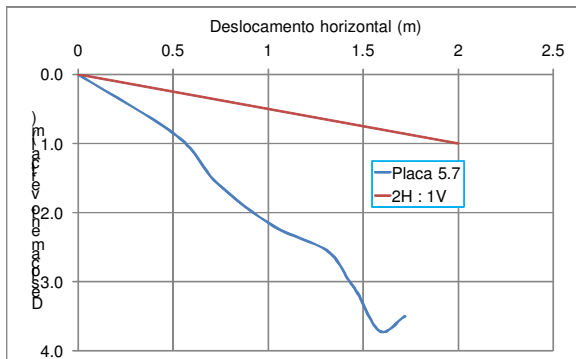
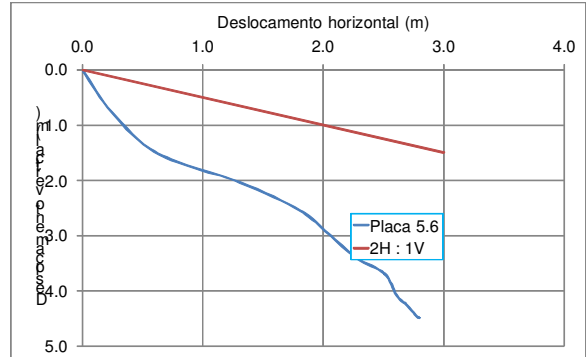
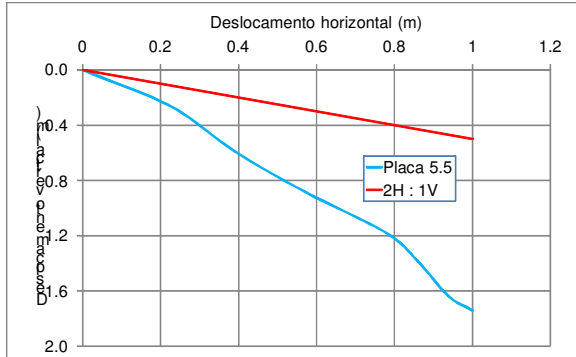
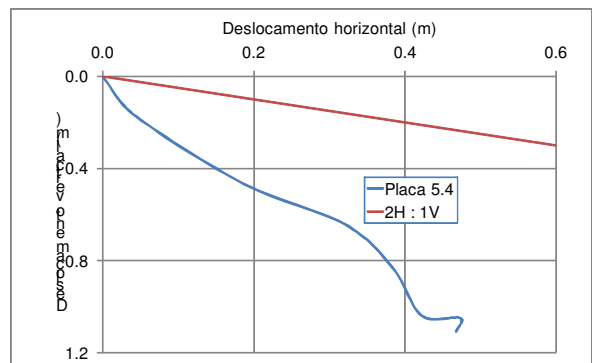
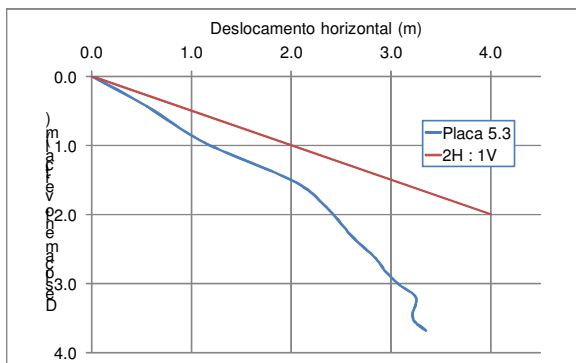
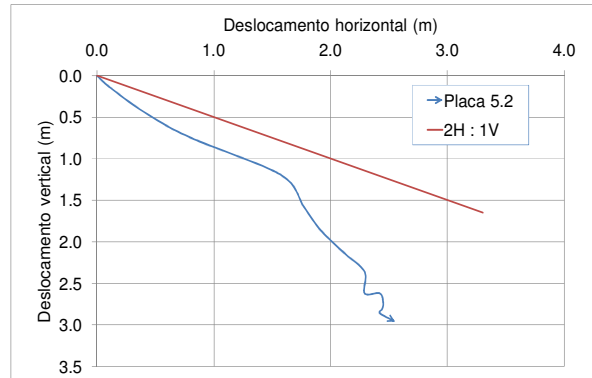
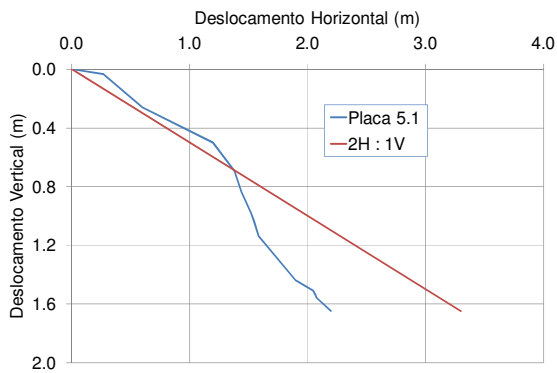


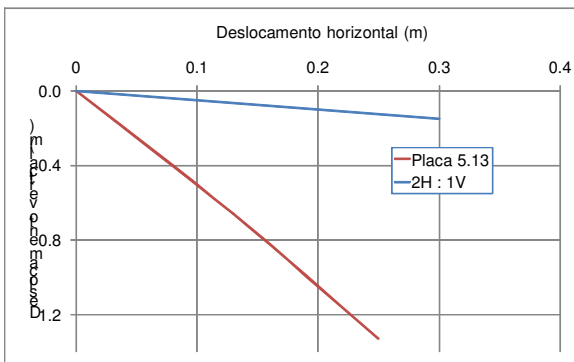
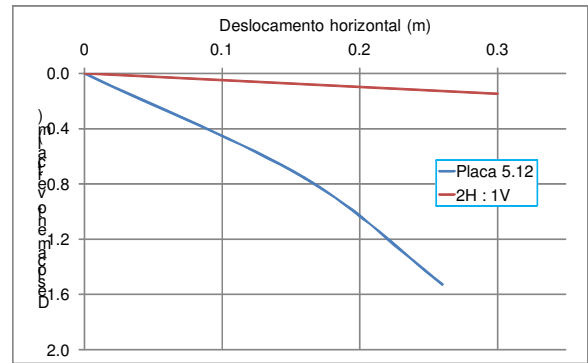
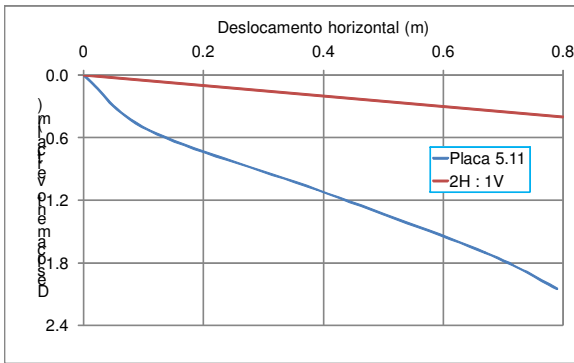
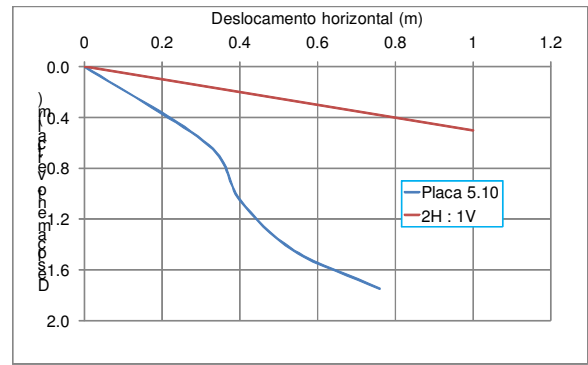
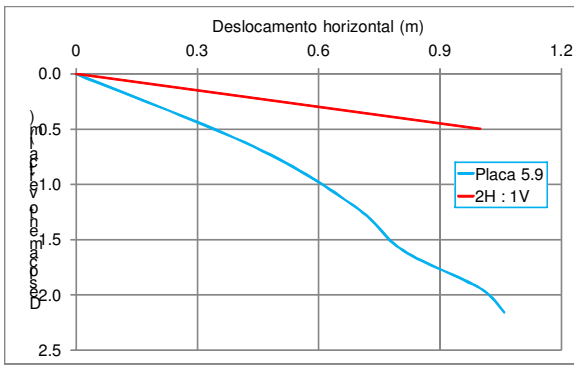
- IBAÑEZ, J.P. *Modelagem constitutiva para solos com ênfase para solos não saturados*. 2003. 241p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro. 2003.
- JAMBU, N. (1963). Soil compressibility as determined by Oedometer and triaxial tests. *European Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Weisbaden, Alemanha, vol 1, pp 19-25.
- JORGE F., BAPTISTI E. e GONÇALVES, A. Monitoramento em aterros sanitários nas fases de enceramento e recuperação: desempenhos mecânico e ambiental. In: SEMINÁRIOS SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2004. São Paulo: ABGE, 2004.
- JUCÁ, J. F. T.; MACHADO, S.; SANTOS I.; FILHO, J.F.T.P.. Simulação Numérica de Provas de Carga Realizadas Em Aterro Sanitário. In : XI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 1998. Brasília. *XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. Brasília, v. 1. p. 269-276.
- JÚNIOR E.J.P. *Uma formulação consistente para análise não-linear de estruturas de cabos suspensos*. 2002. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2002.
- KÖLSCH, F. Material values for some mechanical properties of domestic waste. In: FIFTH INTERNATIONAL LANDFILL SYMPOSIUM, 1995. *Proceedings Sardinia 95*. Cagliari, Itália, 1995.
- KONIG, D.; JESSBERGER, H.L. Waste mechanics. *Special Report of the TC5 Technical Committee on Waste Mechanics*, Hamburg, Germany, 1997, p.35-76.
- LANDVA, A. O.; CLARK, J. I. Geotechnics of waste fills. In: LANDVA, A.; KNOWLES, D. (Ed.) *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, Philadelphia: 1990. p. 86-103.
- LOURENÇO, P. *Métodos computacionais na mecânica dos sólidos não-linear*. Guimarães, Portugal: UMINHO,. Relatório 99-DEC/E-1. 1999. 124 p.
- MACHADO, S.L.; VILAR, O.M.; CARVALHO, M.F. (2008). Constitutive model for long term municipal solid waste mechanical behavior. *Computer and Geotechnics*, v.35, p.775-790. 2008.
- MANASSERO, M; VAN IMPE, W.F.; BOUAZZA, A. Waste Disposal and Containment. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 2. Osaka, 1996.
- MARQUES, A.C.M. *Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos*. 2001. 469 p. Tese (Doutorado em Geotecnia). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2001.
- MARQUES, A.C.M et al. Composite compressibility model for municipal solid waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. vol.124. n.1 p.372-378. 2003.
- MARTINS, H.L. *Avaliação da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de Cisalhamento Direto em equipamento de grandes dimensões*. 2006. 131p. Dissertação (Mestrado em Saneamento). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais. 2006.
- MASE, G.E. *Continuum Mechanics*. Nova Iorque: Mc-Graw Hill. 1970.

- MCDUGALL, J.R. e PYRAH, I.C. Phase relations for decomposable soils. *Geotechnique* v.54, n.7, p.487-493. 2004.
- MCDUGALL, J.R. A hydro-bio-mechanical model for settlement and other behaviour in landfilled waste. *Computer and Geotechnics, Special Issue: Chemo-Mechanical Interaction in Geomaterials*, Vol 34/4, Jul 2007, pp 229-246.
- MCDUGALL, J.R. Waste Heterogeneity; An obstacle to models? In: XII INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 2009. *Proceedings Sardinia 2009*. Itália, 2009.
- MONTEIRO, J.H.P. *Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro: Secretaria Estadual de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República – SEDU: IBAM. 2001. 200 p.
- NASCIMENTO, J.C.F. *Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos*. 2007. 160p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2007.
- PARK, H.I.; LEE, S.R. Long-term settlement behavior of landfills with refuse decomposition. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, v.24, n.4, p.159-165. 1997.
- RELATÓRIO CEMIG 2003 – Ensaio Geotécnicos – GR/EC-LS-R082.
- SADD, M.H. *Elasticity – Theory, Application and Numerics*. Estados Unidos: Editora Elsevier. 2005. 461p.
- SIMÕES, G.F.; CATAPRETA, C.A.A.e MARTINS, H.B. Monitoramento de recalques superficiais como ferramenta de auxílio à avaliação de estabilidade de aterros sanitários – Estudo de caso para o aterro sanitário de Belo Horizonte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, VI, 2007. Porto Alegre, 2007.
- SIMÕES, G.F. Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos. 2000. 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 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 LUSO-BRASILEIRO, XI, 2004. Natal, 2004.
- SIMÕES G.F. e LANES, R.M. Implementação computacional de um modelo acoplado mecânico-biológico para avaliação de recalques em aterros sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, XXV, 2009. Recife, 2009.
- SOLER, N. D. ; MAHER, A. ; CHAE, Y.S. e HAMIDI, A. (1995). A conceptual Model for Transient Settlements in Waste Fills. In: PROC.UNSAT'95, Paris. Alonso & Delage (ed), p.411-416.
- SOWERS, G.F. Settlement of waste disposal fills. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS FOUNDATION ENGINEERING, 8, 1973. Moscow, RU. *Proceedings...* Moscow, 1973.
- WOJNAROWICZ, M.; KNOCHENMUS, G.; VAN IMPE, W. Géotechnique de l'environnement – activités de l'ICSMFE (TC5). *Revue Française de Géotechnique*, n.83,p.3-16. 1998.

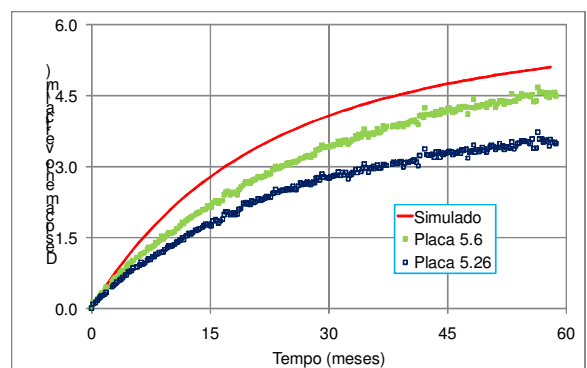
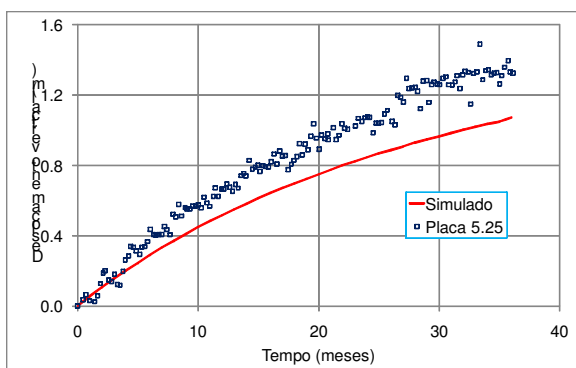
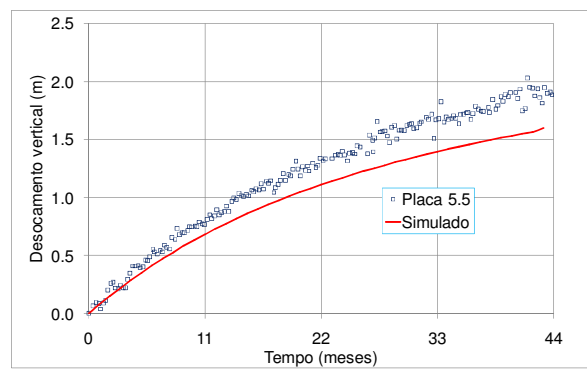
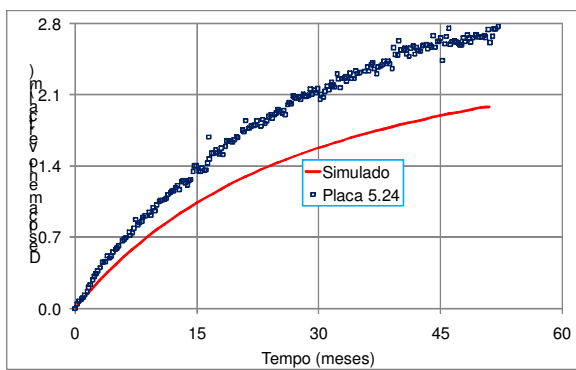
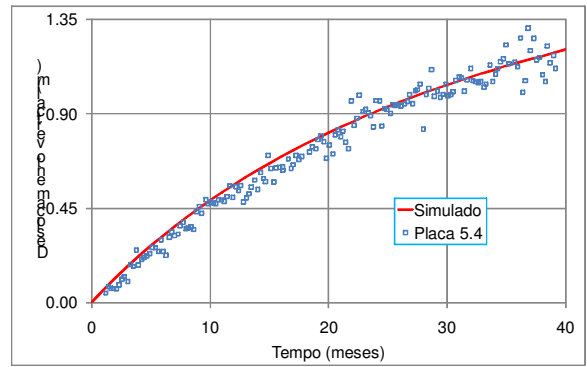
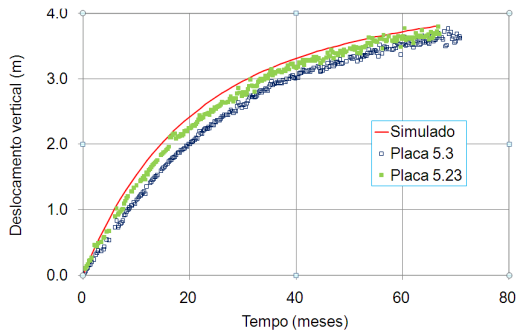
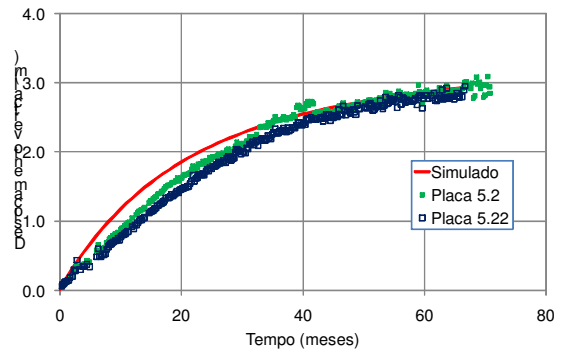
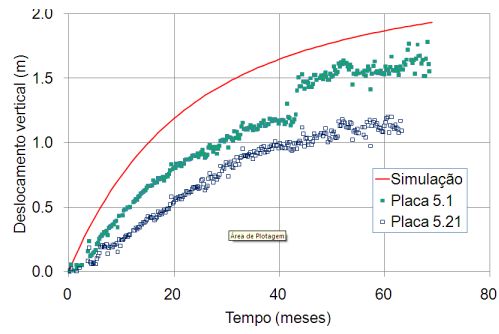
# ANEXOS

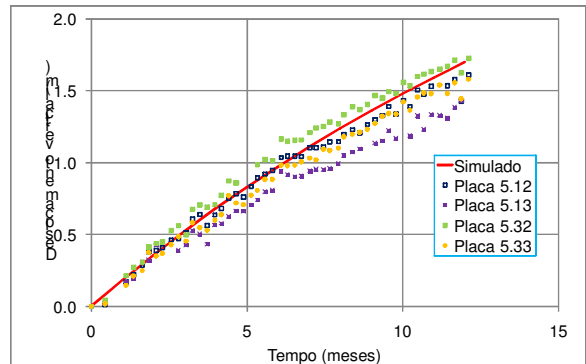
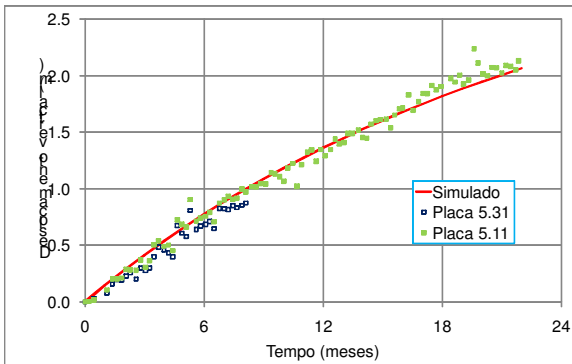
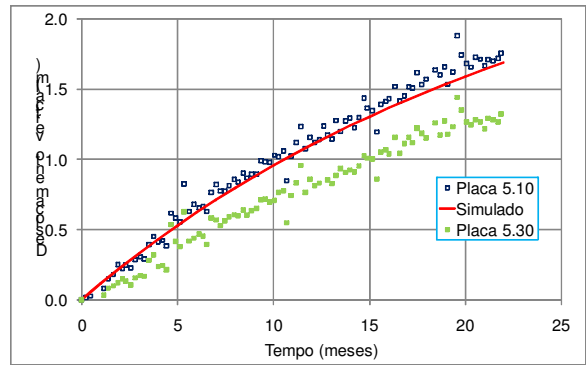
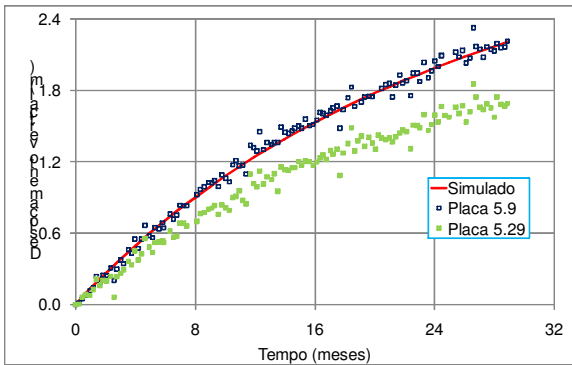
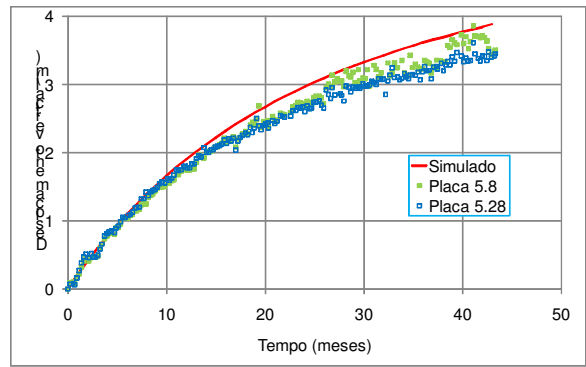
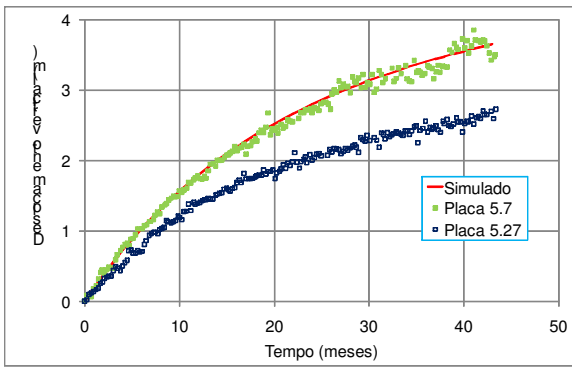
## A. Gráficos deslocamento vertical x deslocamento horizontal





## B. Deslocamentos verticais calibrados com modelo 1D





### C. Evolução dos deslocamentos horizontais monitorados

