UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

GUILHERME CAMPOS MALAVOGLIA

**MODELOS VISCOELÁSTICOS APLICADOS À PREVISÃO DA
COMPRESSÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

São Paulo

2016

GUILHERME CAMPOS MALAVOGLIA

**MODELOS VISCOELÁSTICOS APLICADOS À PREVISÃO DA
COMPRESSÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de concentração: Engenharia
Geotécnica

Orientadora: Prof^a Dr^a Maria
Eugenia Gimenez Boscov

São Paulo

2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

MALAVOGLIA, GUILHERME
MODELOS VISCOELÁSTICOS APLICADOS À PREVISÃO DA
COMPRESSÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS / G. MALAVOGLIA, M. E.
BOSCOV -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
109 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1. Engenharia Civil 2. Geotecnia 3. Resíduos Sólidos I. Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e
Geotécnica II. t. III. BOSCOV, MARIA EUGÊNIA

Aos meus pais Angela e Paulo César,
pelo exemplo, incentivo e ensinamentos,
fundamentais para a conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Maria Eugenia Boscov, pelo papel fundamental na elaboração deste trabalho, com muita paciência e disciplina.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de mestrado em Engenharia Civil.

Ao professor da Escola Politécnica da USP José Jorge Nader, pelas valiosas contribuições ao longo da pesquisa científica.

À Cepollina Engenheiros Consultores LTDA, por aprovar e incentivar a realização do curso de mestrado.

Aos meus pais Angela e Paulo César, e meu irmão Rodrigo, que em todos momentos me incentivaram e me deram suporte para a conclusão desta pesquisa.

RESUMO

Para representar o comportamento de compressão dos resíduos sólidos urbanos (RSU), têm-se utilizado teorias da mecânica dos solos (adensamento de argilas, estado crítico ou solo reforçado com fibras) ou modelos que representam a biodegradação dos materiais orgânicos, assim como ajustes empíricos de dados de monitoramento de campo a funções matemáticas. Algumas tentativas vêm sendo realizadas para descrever todos os diversos mecanismos de compressão a que estão submetidos os maciços sanitários. Esta pesquisa investiga a capacidade de dois modelos viscoelásticos para prever o comportamento de RSU submetidos a carregamento vertical constante sem deformação lateral. O primeiro é o modelo tridimensional de Kelvin-Voigt, que foi aplicado para compressão confinada, e o segundo baseia-se na junção em série de dois corpos de Kelvin-Voigt. Os parâmetros elásticos do primeiro modelo são: módulo de cisalhamento G , módulo de elasticidade E , módulo volumétrico k e coeficiente de Poisson ν , os quais podem ser expressos pelo módulo edométrico M ; o parâmetro viscoso foi denominado H_3 . No segundo modelo, há dois parâmetros elásticos, M_1 e M_2 , e dois parâmetros viscosos, H_4 e H_5 . Utilizaram-se dados da literatura de ensaios de campo (sobrecarga por aterro de solo compactado e ensaio de placa) e laboratório (ensaio de adensamento edométrico), para estimar os parâmetros e avaliar a capacidade dos modelos de prever a evolução dos recalques de RSU em compressão confinada. O primeiro modelo viscoelástico não conseguiu representar adequadamente os ensaios de laboratório, enquanto o segundo modelo proporcionou boa aderência das curvas teóricas aos dados experimentais, tanto de campo como de laboratório, com coeficientes de determinação r^2 maiores ou iguais a 0,87. Os valores dos parâmetros elásticos M do primeiro modelo e M_1 e M_2 foram estimados entre 0,80 e 6,65 MPa. Os parâmetros viscosos H_3 do primeiro modelo e H_4 e H_5 do segundo modelo apresentaram variação de ordens de grandeza. Esta grande variação pode ser devida à diferente composição dos resíduos, como também de poder ter ocorrido uma contribuição significativa da biodegradação no ensaio de campo de maior duração (600 dias), incorporando a perda de massa sólida ao parâmetro viscoso. Os valores de H_3 , H_4 e H_5 nos ensaios de laboratório foram estimados

na ordem de 10^{-1} a 10^6 kPa.dia, sendo o parâmetro H_4 de 2,5 a 142 vezes o valor de H_5 . A estimativa dos parâmetros viscosos deve ser melhorada pela aplicação do segundo modelo viscoelástico a mais ensaios, procurando correlacionar as faixas de valores a características do material, como a composição e a idade dos RSU.

PALAVRAS CHAVE: resíduos sólidos urbanos, compressão, viscoelasticidade, modelagem, previsão de recalques.

ABSTRACT

Compression of municipal solid waste (MSW) has been represented by theories of soil mechanics (consolidation of clays, critical state or soil reinforcement with fibers), by models based on the degradation of organic matter, and by empirical fittings of field monitoring data to mathematical functions. Some attempts have been made to describe all compression mechanisms to which MSW masses are subjected. This research investigates the efficiency of two viscoelastic models to predict MSW compression under a constant vertical load without lateral deformation. The first is the three-dimensional Kelvin-Voigt model, which was simplified to confined compression, and the second results from linking in series two Kelvin-Voigt bodies. The elastic parameters of the first model are: the shear modulus G , modulus of elasticity E , volumetric modulus k and Poisson's ratio ν , which can be expressed by the edometric modulus M ; the viscous parameter was named H_3 . The second model has two elastic parameters, M_1 and M_2 , and two viscous parameters, H_4 and H_5 . Data from field and laboratory tests were used to estimate parameters and to evaluate the efficiency of the two models in predicting the evolution of MSW settlements in confined compression. The first viscoelastic model could not adequately represent the laboratory tests, while the second model provided good adhesion of the theoretical curves to field and laboratory data, with determination coefficients r^2 equal or higher than 0.87. The values of the elastic parameters M of the first model and M_1 and M_2 of the second model were estimated between 0.80 and 6.65 MPa. Viscous parameters H_3 of the first model and H_4 and H_5 of the second model varied in a large range of values. This variation may be due to the different composition of the waste, but also a significant contribution of biodegradation in the longer field trial (600 days) may have occurred, incorporating loss of solid matter to the viscous parameter. The values of H_3 , H_4 and H_5 in laboratory tests were estimated in the order of 10^{-1} to 10^6 kPa.dia, with H_4 parameter 2.5 to 142 times higher than H_5 . The evaluation of the viscous parameters could be improved by the application of the second viscoelastic model to a greater number of tests in order to correlate ranges of values to MSW composition and age.

KEY WORDS: municipal solid waste, MSW, compression, viscoelasticity, modeling, settlement prediction.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DOS RSU.....	17
3.2 MODELOS REOLÓGICOS.....	19
3.2.1 ELEMENTOS REOLÓGICOS VISCOELÁSTICOS	21
3.2.2 EQUAÇÕES REOLÓGICAS VISCOELÁSTICAS COM DOIS ELEMENTOS	22
3.3 ELASTICIDADE LINEAR	29
3.4 MODELO VISCOELÁSTICO TRIDIMENSIONAL DE KELVIN-VOIGT.....	33
3.5 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS ELÁSTICOS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	34
3.5.1 Módulo de Cisalhamento (G)	35
3.5.2 Módulo de Young (E) e coeficiente de Poisson (ν)	39
3.5.3 Resumo dos Valores Encontrados	47
4. METODOLOGIA.....	51
4.1 MODELO TRIDIMENSIONAL VISCOELÁSTICO DE KELVIN-VOIGT APLICADO PARA COMPRESSÃO CONFINADA (1º MODELO)	51
4.2 MODELO TRIDIMENSIONAL VISCOELÁSTICO COMPOSTO DE DOIS ELEMENTOS DE KELVIN-VOIGT LIGADOS EM SÉRIE APLICADO PARA COMPRESSÃO CONFINADA (2º MODELO).....	55
4.3 DADOS DE COMPRESSÃO CONFINADA DE RSU.....	57
4.3.1 COMPRESSÃO CONFINADA EM CAMPO – VAN ELK ET AL. (2014)..	57
4.3.2 COMPRESSÃO CONFINADA EM CAMPO – CAMPI (2011)	60
4.3.3 COMPRESSÃO CONFINADA EM LABORATÓRIO – CARVALHO (1999)	62
4.3.4 COMPRESSÃO CONFINADA EM LABORATÓRIO – HOSSAIN et al. (2009)	63
4.4 APLICAÇÕES DOS MODELOS NA SIMULAÇÃO DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO CONFINADA.....	65
4.4.1 Estimativa dos parâmetros do primeiro modelo por derivação da equação constitutiva	66
4.4.2 Estimativa dos parâmetros do primeiro modelo por minimização do erro...	68
4.4.3 Estimativa dos parâmetros do segundo modelo	69

4.4.4	Qualidade dos ajustes	69
5.	RESULTADOS DO MODELO TRIDIMENSIONAL VISCOELÁSTICO DE KELVIN-VOIGT APLICADO PARA COMPRESSÃO CONFINADA (1º MODELO).....	71
5.1	RESULTADOS A PARTIR DOS PARÂMETROS M e $H3$ ESTIMADOS ATRÁVES DOS PONTOS EXPERIMENTAIS:.....	71
5.2	COMPRESSÃO CONFINADA EM CAMPO – VAN ELK et al. (2014)	72
5.3	COMPRESSÃO CONFINADA EM CAMPO – CAMPI (2011)	77
5.4	COMPRESSÃO CONFINADA EM LABORATÓRIO – CARVALHO (1999)....	78
5.5	COMPRESSÃO CONFINADA EM LABORATÓRIO – HOSSAIN et al. (2009)..	81
6.	RESULTADOS DO MODELO TRIDIMENSIONAL VISCOELÁSTICO COMPOSTO DE DOIS ELEMENTOS DE KELVIN-VOIGT LIGADOS EM SÉRIE APLICADO PARA COMPRESSÃO CONFINADA (2º MODELO).....	83
6.1	COMPRESSÃO CONFINADA EM CAMPO – VAN ELK et al. (2014)	84
6.2	COMPRESSÃO CONFINADA EM CAMPO – CAMPI (2011)	86
6.3	COMPRESSÃO CONFINADA EM LABORATÓRIO – CARVALHO (1999)....	87
6.4	COMPRESSÃO CONFINADA EM LABORATÓRIO – HOSSAIN et al. (2009)..	92
6.5	RESUMO DOS VALORES OBTIDOS.....	94
7.	CONCLUSÕES.....	98
7.1	CONCLUSÕES SOBRE OS AJUSTES FEITOS COM O MODELO TRIDIMENSIONAL VISCOELÁSTICO DE KELVIN-VOIGT APLICADO PARA COMPRESSÃO CONFINADA (1º MODELO).....	99
7.2	CONCLUSÕES SOBRE OS AJUSTES FEITOS COM O MODELO TRIDIMENSIONAL VISCOELÁSTICO COMPOSTO DE DOIS ELEMENTOS DE KELVIN-VOIGT LIGADOS EM SÉRIE APLICADO PARA COMPRESSÃO CONFINADA (2º MODELO)	100
7.3	SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA	102
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Processos microbiológicos na degradação de compostos orgânicos em aterros sanitários (SCHNEIDE, 2010).....	19
Figura 3.2: Mola elástica de Hooke.	21
Figura 3.3: Pistão de Newton.	22
Figura 3.4: Modelo de Maxwell.	23
Figura 3.5: Modelo de Maxwell. Gráfico de fluência (COGLIATI, 2011).	24
Figura 3.6: Modelo de Maxwell. Relaxação (COGLIATI, 2011).	25
Figura 3.7: Modelo de Kelvin-Voigt.	26
Figura 3.8: Modelo de Kelvin-Voigt. Fluência (COGLIATI, 2011).	27
Figura 3.9: Modelo de Kelvin-Voigt. Ocorre relaxação (COGLIATI, 2011).	27
Figura 3.10: Sólido Linear Padrão.	28
Figura 3.11: Sólido Linear Padrão. Fluência (COGLIATI, 2011).	29
Figura 3.12: Sólido Linear Padrão. Relaxação (COGLIATI, 2011).	29
Figura 3.13: Módulos de cisalhamento G obtidos pelo ensaio <i>crosshole</i> no aterro sanitário Bandeirantes-SP (CARVALHO, 1999).	35
Figura 3.14: Módulos de cisalhamento inicial G_i obtidos pelo ensaio pressiométrico em aterros sanitários do Reino Unido (DIXON et al., 2006).	36
Figura 3.15: Módulos de cisalhamento G obtidos pelo método <i>surface wave</i> e comparados com os módulos G_s obtidos para deformações de 0,0001 no primeiro ciclo de carga-recarga da curva pressiométrica (DIXON et al., 2006).	37
Figura 3.16: Módulo de cisalhamento corrigido G_{scor} obtido pelo ensaio pressiométrico para deformações entre 0,0001 a 0,01 usando os ciclos de carga-descarga (DIXON et al., 2006).	38
Figura 3.17: Módulos de cisalhamento G obtidos pelo ensaio <i>surface wave</i> em função da profundidade para resíduo com peso específico de 5 kN/m ³ (ELK et al., 2014).	39
Figura 3.18: Módulo de elasticidade E em função da profundidade obtido por ensaio <i>crosshole</i> no aterro Bandeirantes, São Paulo (CARVALHO, 1999).	40
Figura 3.19: Coeficiente de Poisson ν em função da profundidade obtido por ensaio <i>crosshole</i> no aterro Bandeirantes, São Paulo (CARVALHO, 1999).	41
Figura 3.20: Módulos de elasticidade obtidos por ensaios triaxiais e compressão confinada: (a) amostra T2A; (b) amostra T2B; (c) amostra T1B do aterro Bandeirantes, São Paulo (CARVALHO, 1999).	43
Figura 3.21: Módulos de elasticidade obtidos por ensaios de placa; (a) nos pontos P5, P6, P7, P8 e P9; (b) nos pontos P10, P11, P12, P13, P14 e P15 (CAMPI, 2011)	44
Figura 3.22: Módulos de Elasticidades de RSU (MANASERO; VAN IMPE e BOUAZZA, 1996).	45
Figura 3.23: Valores de coeficiente de Poisson (KARIMPOUR-FARD e MACHADO, 2012).	46
Figura 3.24: Valores de coeficiente de Poisson (HOUSTON et al., 1995).	47
Figura 4.1: Elementos do modelo reológico de Kelvin-Voigt ligados em série.	56
Figura 4.2: Monitoramento das duas linhas de recalque: (a) seção 1 (b) seção 2 (VAN ELK et al., 2014).	59
Figura 4.3: Curvas de recalque versus tempo para uma carga constante de 6 tf nos pontos P6, P7, P8, P9, P10 e P11 (CAMPI, 2011).	61

Figura 4.4: Curva de deformação axial ao longo do tempo para o estágio de carga de 80kPa em uma amostra com peso específico inicial de 8 kN/m ³ (CARVALHO, 1999).	63
Figura 4.5: Comparação dos recalques de duas amostras com diferentes fatores r , submetidas a ensaio edométrico com diâmetro de 300 mm (HOSSAIN et al., 2009).	64
Figura 4.6: Croqui demonstrativo para determinação de $M = \sigma v_0 \gamma$ e $H_3 = 3\sigma v_0 t g \alpha$ a partir da curva experimental.	67
Figura 5.1: Ajuste do 1º modelo viscoelástico a partir da estimativa dos parâmetros M e H_3 pela curva experimental de VAN ELK et al. (2014).	71
Figura 5.2: Ajuste do 1º modelo viscoelástico a partir da estimativa dos parâmetros M e H_3 pela curva experimental de CARVALHO (1999).	72
Figura 5.3: Ajuste do modelo viscoelástico aos recalques de campo de Van Elk et al. (2014) para diferentes valores de coeficiente de Poisson.	73
Figura 5.4: Ajuste do modelo viscoelástico para diferentes valores de H_3 com coeficiente de Poisson de 0,20 e módulo de Elasticidade de 1000 kPa	74
Figura 5.5: Ajuste do modelo viscoelástico para diferentes valores de módulo de elasticidade com coeficiente de Poisson e coeficiente de viscosidade fixados em 0,20 e 460.000 kPa.dia, respectivamente.	75
Figura 5.6: Ajuste do modelo viscoelástico para diferentes valores de coeficiente de Poisson com módulo de elasticidade e coeficiente de viscosidade fixados em 1.000 kPa e 460.000 kPa.dia, respectivamente	76
Figura 5.7: Ajuste do modelo viscoelástico aos recalques de campo de Campi (2011) para diferentes valores de coeficiente de Poisson.	77
Figura 5.8: Ajuste do modelo viscoelástico para a amostra T2A8COM de Carvalho (1999) no carregamento correspondente a 40 kPa.	79
Figura 5.9: Ajuste do modelo viscoelástico para a amostra T2A8COM de Carvalho (1999) no carregamento correspondente a 80 kPa.	79
Figura 5.10: Ajuste do modelo viscoelástico para a amostra T2A8COM de Carvalho (1999) no carregamento correspondente a 160 kPa.	80
Figura 5.12: Ajuste do modelo viscoelástico para a amostra $r=0,13$ de Hossain et al. (2009) às deformações do ensaio edométrico até 3 dias de carregamento.	81
Figura 6.1: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de campo de Van Elk et al. (2014) com $M_1 \neq M_2$.	84
Figura 6.2: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de campo de Van Elk et al. (2014) com $M_1 = M_2$.	85
Figura 6.3: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de campo de Campi (2011) com $M_1 \neq M_2$.	86
Figura 6.4: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de campo de Campi (2011) com $M_1 = M_2$.	86
Figura 6.5: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Carvalho (1999) para o estágio de carregamento de 40 kPa com $M_1 \neq M_2$.	88
Figura 6.6: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Carvalho (1999) para o estágio de carregamento de 40 kPa com $M_1 = M_2$.	88
Figura 6.7: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Carvalho (1999) para o estágio de carregamento de 80 kPa com $M_1 \neq M_2$.	89
Figura 6.8: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Carvalho (1999) para o estágio de carregamento de 80 kPa com $M_1 = M_2$.	89

Figura 6.9: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Carvalho (1999) para o estágio de carregamento de 160 kPa com $M1 \neq M2$	90
Figura 6.10: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Carvalho (1999) para o estágio de carregamento de 160 kPa com $M1 = M2$	90
Figura 6.11: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Hossain et al. (2009) para o estágio de carregamento de 95 kPa com $M1 \neq M2$	92
Figura 6.12: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Hossain et al. (2009) para o estágio de carregamento de 95 kPa com $M1 = M2$	93

1. INTRODUÇÃO

O estudo das características, comportamento e parâmetros dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é relativamente novo em comparação a Mecânica dos Solos. Com o crescimento populacional mundial nos últimos anos e as crescentes preocupações com o meio ambiente, a gestão mais aprimorada dos RSU se tornou fundamental.

As linhas de pesquisas direcionadas ao comportamento dos resíduos sólidos têm crescido continuamente nas últimas décadas, tendo em vista a pouca evolução da reciclagem e o decrescente espaço físico para implantação de novos aterros sanitários, acarretando aterros muito altos, de até mais de 100 metros de altura.

Exemplos dessa questão são os deslizamentos dos aterros sanitários Bandeirantes em 1991, Sítio São João em 2007 e Itaquaquecetuba em 2011. A partir da ruptura do aterro sanitário Bandeirantes iniciaram-se as pesquisas para obtenção dos parâmetros de resistência dos RSU brasileiros (BENVENUTO e CUNHA, 1991). Os estudos foram sendo desenvolvidos e intensificados a partir de acidentes e complicações existentes nos aterros sanitários.

A compressibilidade dos RSU é uma propriedade mecânica fortemente influenciada pela composição e estado de alteração do resíduo, bem como pelo comportamento mecânico de cada componente.

A quantificação das propriedades mecânicas desses materiais é uma tarefa difícil, devido à composição heterogênea do RSU e à presença de componentes com diferentes formas e dimensões, o que dificulta, sobretudo, a obtenção de amostras de boa qualidade e a definição do tamanho das amostras e tipos de ensaios mais adequados a serem utilizados (CARVALHO, 1999).

As propriedades mecânicas dos RSU são avaliadas através dos métodos convencionais de ensaios desenvolvidos para solos ou por retroanálise de dados de campo, utilizando-se geralmente modelos de comportamento da

Mecânica dos Solos. Porém, é necessário tomar os devidos cuidados ao estender para os RSU os conceitos e teorias da Mecânica dos Solos, pois existem muitas diferenças entre esses materiais.

Por exemplo, os recalques de aterros sanitários têm sido estudados pelas teorias de compressibilidade dos solos, dividindo-os em recalques imediato, primário e secundário. Deve-se lembrar de que as hipóteses da teoria de adensamento de Terzaghi são pouco adequadas para os RSU: validade da lei de Darcy, completa saturação do meio, partículas sólidas homogêneas, compressibilidade insignificante das partículas sólidas e do fluido intersticial, independência de algumas propriedades com a variação da tensão efetiva, compressão unidimensional, vazão unidimensional e relação da tensão com o índice de vazios linear (BOSCOV, 2008). No caso dos recalques secundários, não são separadas explicitamente as parcelas de *creep* e biodegradação.

Outros modelos desenvolvidos especificamente para RSU, por outro lado, atêm-se aos recalques de longo prazo ocasionados pela biodegradação, sem incorporar a parcela de *creep*, como por exemplo o modelo de Meruelo descrito por Palma (1995). Porém, observa-se nos aterros sanitários um contínuo recalque ao longo de décadas, ainda significativo mesmo após a ocorrência da biodegradação da maior parte da matéria orgânica (ABREU; BOSCOV, 2000). Recalques prolongados após a aplicação de uma carga superficial também indicam um comportamento viscoso desse material. A viscosidade, contudo, é uma propriedade ainda pouco estudada dos RSU.

Os modelos viscoelásticos estudados nesta pesquisa podem apresentar características que os tornam mais adequados, em diversas situações, a fornecer resultados mais realistas que os modelos consagrados pela elastoplasticidade clássica, utilizados na engenharia. Observa-se que são pouco encontradas na literatura adaptações de modelos viscoelásticos para o comportamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU), tais como os de Gibson & Lo (1961).

2. OBJETIVO

A hipótese da pesquisa é que os resíduos sólidos urbanos apresentam um comportamento viscoso, o qual acarreta deslocamentos por tempo prolongado. O comportamento viscoso dos RSU é pouco importante inicialmente devido à predominância dos recalques por biodegradação, mas deveria ser considerado separadamente quando a biodegradação se encontra em estágio avançado e não contribui mais significativamente para a evolução dos recalques.

O objetivo desta pesquisa é avaliar a eficiência de dois modelos viscoelásticos na representação do comportamento dos resíduos sólidos urbanos à compressão sem deformação lateral em situações em que não é significativa a contribuição da biodegradação no desenvolvimento de recalques.

Os modelos estudados foram:

- O Modelo Tridimensional de Kelvin-Voigt, extensão do modelo reológico de Kelvin-Voigt, o qual consiste na associação em paralelo da mola elástica de Hooke com o pistão viscoso de Newton. Este modelo foi aplicado para a solicitação de compressão sem deformação lateral;
- Um modelo composto pela ligação em série de dois conjuntos de Kelvin-Voigt, estendidos para a tridimensionalidade e aplicados para a solicitação de compressão sem deformação lateral.

Os dois modelos foram aplicados a uma seleção de ensaios de campo e laboratório com RSU em condição de compressão confinada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DOS RSU

A resistência ao cisalhamento de maciços de RSU é associada a um ângulo de atrito interno e uma coesão, definidos a partir da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb. Os RSU no estado inicial de disposição não apresentam coesão, por serem basicamente granulares; o intercepto coesivo determinado nesta fase, assim como os altos valores de intercepto coesivo obtidos em RSU de maneira geral, são devidos aos componentes fibrosos (sacos plásticos, trapos, madeiras etc.) que imprimem um mecanismo de reforço similar ao de um solo granular reforçado com fibras orientadas aleatoriamente, conhecido como "efeito-fibra". Borgatto et al. (2014) estimaram contribuição das fibras à coesão aparente da ordem de 10 kPa.

Os RSU podem apresentar elevadas deformações sem atingir um estado de ruptura, com resistência crescente em função da deformação. Assim, a coesão e o ângulo de atrito dos RSU devem ser sempre especificados a um nível de deformação aceitável. Projetistas e pesquisadores têm adotado deformações entre 5 e 40% para definir a ruptura (KNOCHENMUS; WOJNAROWICZ; VAN IMPE, 1998; BRAY et al., 2009; REDDY et al., 2009; CAMPI; BOSCOV, 2011). A norma alemã DIN 18137-3 (2002) estabelece os critérios de deslocamento horizontal de 34 mm em ensaio de cisalhamento direto ou 15% de deformação.

A compressão de maciços sanitários resulta dos processos de carregamento e alterações das características e propriedades dos materiais componentes do maciço de RSU. Os principais mecanismos de compressão dos maciços sanitários são (ABREU, 2000): solicitação mecânica (distorção, dobra, esmagamento, quebra e rearranjo dos materiais), ravinamento interno (erosão e migração dos materiais finos para os vazios entre partículas maiores); alterações físico-químicas (corrosão, oxidação e combustão dos materiais); biodegradação (causando transferência de massa da fase sólida para as fases líquida e gasosa); dissipação das pressões neutras de líquidos e gases (semelhante ao adensamento de solos, decorre da expulsão de líquidos e gases do interior do maciço devido a carregamento e demanda certo tempo);

creep (deformação lenta sob carga constante devida a fenômenos viscosos); e interação entre os mecanismos.

Desses mecanismos, somente a solicitação mecânica e a dissipação das pressões neutras estão relacionadas ao carregamento imposto; os demais dependem do ambiente em que se encontram os resíduos (ar, umidade, temperatura, entre outros) e das transformações bioquímicas no interior do aterro (BOSCOV, 2006).

Alguns valores reportados de recalques em relação à espessura total inicial dos aterros sanitários são da ordem de 30% (SOWERS, 1973), entre 25% e 50% (WALL; ZEISS, 1995); entre 10% e 25% (VAN MEERTEN et al., 1995), entre 20% e 25% (COUMOULOS; KORYALOS, 1997); 10% a 30% (ABREU, 2000) e 6% (PEREIRA, 2000).

Mesmo considerando os recalques imediatos por solicitação mecânica e os recalques ao longo do tempo devido ao *creep*, a biodegradação é o principal processo de desenvolvimento dos recalques dos maciços sanitários. A contribuição da biodegradação é tanto mais significativa quanto maior o teor de matéria orgânica putrescível na composição dos resíduos.

A evolução dos recalques por biodegradação ao longo do tempo está relacionada aos diferentes estágios de decomposição e sua velocidade tende a decrescer significativamente com o tempo. Os mecanismos da biodegradação dos RSU têm sido estudados no meio técnico, e dentre as diversas propostas de classificá-los, pode-se citar: fase aeróbia, fase anaeróbia ácida, fase de aceleração da produção de metano, fase da redução da produção de metano (SCHNEIDE, 2010), conforme ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1: Processos microbiológicos na degradação de compostos orgânicos em aterros sanitários (SCHNEIDE, 2010).

Alguns modelos matemáticos de compressão dos RSU em função do tempo agregam explicitamente a biodegradação, como os modelos de Zimmerman et al. (1977), Meruelo (Palma, 1995), Marques et al. (2002), McDougall (2007), entre outros.

Os recalques por mecanismo viscoso também são importantes e têm sido incorporados a praticamente todos os modelos de previsão de recalques de RSU, geralmente representados pelo adensamento secundário ou compressão secundária, conceitos geotécnicos mais usuais.

Embora a biodegradação possa continuar por décadas, são nos recalques de longo prazo, quando a geração de metano já está em estágio reduzido (ABREU: BOSCOV, 2000), que se faz sentir a importância dos fenômenos viscosos. Também pode se observar o recalque por mecanismos viscosos durante ensaios de tempos reduzidos, em situações em que a contribuição da biodegradação não justifica os recalques observados (CAMPI, 2011).

3.2 MODELOS REOLÓGICOS

A reologia investiga e expressa a relação entre tensão, deformação e velocidade de deformação, entre outras grandezas. Os modelos reológicos

explicam o comportamento de um material representando-o por modelos simples ou combinações de modelos simples, cujo comportamento é de fácil interpretação.

Conforme comentado por Cogliati (2011), uma abordagem para prever o comportamento de materiais submetidos à tensão é a análise dos resultados, sem se importar com a microestrutura do material. Pode-se imaginar, por exemplo, que a primeira parte (pequenas deformações) da curva tensão-deformação de um solo, obtida de um ensaio de compressão simples, corresponde à deformação que sofre uma mola elástica quando comprimida. Seria uma forma de tratar o solo como uma “caixa preta”, sem analisar o que acontece com as partículas quando submetidas a uma tensão e sim com o resultado que esse esforço provoca.

Pensando desta forma, podem-se combinar outros elementos, além de molas, para representar o resultado de ensaios realizados em solos e em qualquer outro material que se tenha interesse. Por exemplo, os modelos que combinam molas e pistões são utilizados para representar qualitativamente o comportamento de materiais viscoelásticos (MALVERN, 1969).

Um ponto chave em modelar o comportamento viscoelástico de diferentes materiais está em escolher a forma adequada das componentes elástica e viscosa, isto é, combinar os elementos no melhor sistema possível para que o comportamento em função do tempo seja previsto adequadamente (DINIS, 2005). Cada elemento possui uma constante que o caracteriza, influenciando no resultado da curva tensão-deformação (COGLIATI, 2011).

A seguir são apresentados os modelos reológicos simples, representados por um só elemento, a mola elástica (Modelo de Hooke) e o pistão com líquido viscoso (Modelo de Newton), assim como suas equações constitutivas. Posteriormente são apresentadas combinações desses elementos para representar os modelos reológicos viscoelásticos de Maxwell, Kelvin-Voigt e Sólido Linear Padrão e as respectivas equações constitutivas.

Para os modelos compostos por mais de um elemento são apresentadas ainda as equações de fluência e de relaxação. A fluência é o fenômeno de

desenvolvimento de deformações ao longo do tempo de um material solicitado por tensão constante, enquanto a relaxação de um material solicitado por uma determinada tensão é caracterizada pelo decréscimo gradual da tensão ao longo de tempo com a imposição de uma deformação constante (MASE; MASE, 1999).

Esta sequência de apresentação de modelos reológicos e suas equações constitutivas segue o trabalho de Cogliati (2011), o qual se considerou muito didático e esclarecedor.

3.2.1 ELEMENTOS REOLÓGICOS VISCOELÁSTICOS

3.2.1.1 Modelo de Hooke

O modelo consiste em representar o comportamento de uma mola elástica submetida a tensões de tração ou compressão (Figura 3.2). O comportamento da mola é linear e elástico neste caso.

Figura 3.2: Mola elástica de Hooke.

A equação reológica do modelo é apresentada a seguir.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad 3.1$$

O módulo de elasticidade (E) relaciona linearmente a tensão e a deformação.

Nota-se que uma determinada tensão aplicada à mola ocasionará uma deformação correspondente. Se a mola for descarregada ela voltará à sua configuração inicial, o que a caracteriza como uma mola elástica. A deformação

resultante de um carregamento é diretamente proporcional à tensão aplicada, caracterizando o comportamento como linear.

3.2.1.2 Modelo de Newton

O modelo consiste em representar o comportamento de um pistão contendo um líquido viscoso submetido a tensões de tração ou compressão (Figura 3.3). Neste caso o líquido viscoso oferece resistência ao escoamento.

Figura 3.3: Pistão de Newton.

A equação reológica do modelo é apresentada a seguir.

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon} \quad 3.2$$

Quando aplicada uma tensão ao pistão de Newton, a deformação inicial é nula e com o decorrer do tempo aumenta de forma linear. Isso porque o fluido oferece resistência ao escoamento. A magnitude da resistência será determinada pelo valor do coeficiente de viscosidade η . O termo $\dot{\epsilon}$ na equação 3.2 refere-se à velocidade de deformação.

3.2.2 EQUAÇÕES REOLÓGICAS VISCOELÁSTICAS COM DOIS ELEMENTOS

As equações reológicas com dois elementos são definidas pela combinação em série ou em paralelo dos elementos reológicos apresentados no item anterior, analogamente aos modelos elétricos.

Quando os elementos são combinados em paralelo, a tensão total aplicada é dividida nos elementos e a deformação é a mesma em cada um deles. O contrário acontece quando os elementos são combinados em série. As tensões aplicadas são iguais nos elementos da série e a deformação total do sistema é a soma das deformações de cada um deles.

A seguir são apresentados modelos reológicos em uma direção e uma breve explicação de como cada um deles é representado.

3.2.2.1 Modelo de Maxwell

O modelo é representado pela combinação em série de uma mola elástica e o pistão de Newton, apresentando assim uma porção elástica e uma porção viscosa (Figura 3.4).

Figura 3.4: Modelo de Maxwell.

A equação constitutiva do modelo está apresentada a seguir.

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E} + \frac{\sigma(t)}{\eta} \quad 3.3$$

A fluência é o fenômeno caracterizado pelo desenvolvimento das deformações sob tensão constante.

$$\sigma(t) = \sigma_0 = cte \quad 3.4$$

Logo:

$$\dot{\sigma}(t) = 0 \quad 3.5$$

Substituindo-se $\sigma(t)$ e $\dot{\sigma}(t)$ na equação 3.3:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\sigma_0}{\eta} \quad 3.6$$

Integrando a equação 3.6 no tempo:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\eta} t + \varepsilon_0 \quad 3.7$$

Considerando-se que a deformação inicial é a deformação da mola, para $t=0$ tem-se:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E} \quad 3.8$$

Chega-se assim à equação de fluência do modelo de Maxwell:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\eta} t + \frac{\sigma_0}{E} \quad 3.9$$

No instante inicial, ocorre a deformação na mola e, ao longo do tempo, ocorre a deformação do pistão de Newton, que cresce linearmente com tempo. A Figura 3.5 apresenta a fluência do elemento de Maxwell.

Figura 3.5: Modelo de Maxwell. Gráfico de fluência (COGLIATI, 2011).

A relaxação é caracterizada pela variação das tensões com a imposição de uma deformação constante.

Quando a deformação é constante, a velocidade de deformação é nula. Portanto, $\dot{\epsilon} = 0$. Substituindo $\dot{\epsilon} = 0$ na equação 3.3:

$$\dot{\sigma}(t) = -\frac{E}{\eta} \sigma(t) \quad 3.10$$

Integrando a equação 3.10 no tempo e considerando que no instante inicial $t=0$, $\sigma(t) = \sigma_0$, obtemos a equação de relaxação do modelo de Maxwell:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E}{\eta}t} \quad 3.11$$

Analisando a equação 3.11, percebe-se que, quanto maior for a relação $\frac{E}{\eta}$, mais rápida é a relaxação ao longo do tempo. A Figura 3.6 apresenta o comportamento da tensão ao longo do tempo para uma deformação constante.

Figura 3.6: Modelo de Maxwell. Relaxação (COGLIATI, 2011).

3.2.2.2 Modelo de Kelvin-Voigt

O modelo é representado pela combinação em paralelo da mola de Hooke com o pistão de Newton (Figura 3.7).

Figura 3.7: Modelo de Kelvin-Voigt.

A equação constitutiva do modelo está apresentada a seguir.

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t) + \eta \cdot \dot{\varepsilon}(t) \quad 3.12$$

Determinação da equação para a fluência ($\sigma(t) = \sigma_0$) do modelo:

Substituindo $\sigma(t) = \sigma_0$ na equação 3.12, temos:

$$\sigma_0 = E \cdot \varepsilon(t) + \eta \cdot \dot{\varepsilon}(t) \quad 3.13$$

Integrando a equação 3.13 em função do tempo, chega-se a equação de fluência que relaciona a deformação com o tempo no modelo Kelvin-Voigt:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t} \right) \quad 3.14$$

A Figura 3.8 apresenta o comportamento da deformação do corpo de Kelvin-Voigt ao longo do tempo. Nesta configuração o elemento que comanda a velocidade de deformação é o pistão, não ocorrendo deformação instantânea. Como a mola possui um limite de deformação, o conjunto tem deformação limite igual à deformação máxima da mola $\frac{\sigma_0}{E}$.

Figura 3.8: Modelo de Kelvin-Voigt. Fluência (COGLIATI, 2011).

Determinação da equação para a relaxação ($\dot{\varepsilon} = 0$) do modelo:

Substituindo ($\dot{\varepsilon} = 0$) na equação 3.12, temos a equação da relaxação para o modelo de Kelvin-Voigt:

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon_0 \quad 3.15$$

Na relaxação $\dot{\varepsilon} = 0$, portanto a equação constitutiva se reduz à equação 3.15, onde a tensão se manterá constante ao longo do tempo enquanto houver deformação constante. Sendo assim, há relaxação brusca neste modelo.

Figura 3.9: Modelo de Kelvin-Voigt. Ocorre relaxação (COGLIATI, 2011).

3.2.2.3 Modelo Viscoelástico do Sólido Linear Padrão

O modelo do sólido linear padrão é representado pela combinação de dois elementos elásticos e um elemento viscoso (Figura 3.10). Tal combinação pode ser feita com um elemento elástico em paralelo a um elemento de Maxwell ou um elemento elástico associado em série a um elemento de Kelvin-Voigt.

Figura 3.10: Sólido Linear Padrão.

As equações 3.16 e 3.17 representam, respectivamente, as equações constitutiva e de fluência do sólido linear padrão.

Equação constitutiva:

$$\dot{\varepsilon}(t)[E_1 + E_2] = \dot{\sigma}(t) + \frac{E_2}{\eta}\sigma(t) - \frac{E_1 \cdot E_2}{\eta}\varepsilon(t) \quad 3.16$$

Equação na fluência:

$$\varepsilon(t) = \left[\varepsilon_0 - \frac{\sigma_0}{E_1} \right] \cdot e^{-\frac{E_1 \cdot E_2}{\eta[E_1 + E_2]} \cdot t} + \frac{\sigma_0}{E_1} \quad 3.17$$

Figura 3.11: Sólido Linear Padrão. Fluência (COGLIATI, 2011).

A equação 3.18 representa a equação para a relaxação do sólido linear padrão:

$$\sigma(t) = (\sigma_0 - E_1 \cdot \varepsilon_0) \cdot e^{-\frac{E_2}{\eta} t} + E_1 \cdot \varepsilon_0 \quad 3.18$$

Figura 3.12: Sólido Linear Padrão. Relaxação (COGLIATI, 2011).

As deduções das equações constitutivas, de fluência e de relaxação aqui apresentadas podem ser analisadas com maiores detalhes em Cogliati (2011) ou em Sukić (1969).

3.3 ELASTICIDADE LINEAR

Este item apresenta uma breve revisão sobre a teoria da elasticidade linear para materiais lineares e isotrópicos. Tal explanação auxiliará o entendimento

do modelo viscoelástico tridimensional de Kelvin, o qual será apresentando posteriormente.

“A Elasticidade Linear é a teoria constitutiva mais conhecida entre os engenheiros. Ainda que o comportamento dos solos seja muito diferente do indicado por essa teoria, é importante conhecê-la por mais de uma razão. Em primeiro lugar, a Elasticidade Linear está presente na Mecânica dos Solos tradicional, como no estudo da distribuição de tensões no solo, no cálculo de recalques e na Teoria do Adensamento de Terzaghi. Em segundo lugar, a Elasticidade Linear, por ser simples e conhecida, é o ponto de partida didático para o estudo de modelos; à medida que ficam claros os defeitos dessa teoria na representação do comportamento mecânico dos solos, surgem ideias de como elaborar teorias mais complexas, adequadas a esses materiais” (NADER, 2014).

A equação constitutiva para materiais elásticos lineares e isotrópicos é definida a seguir:

$$\mathbf{T} = \Lambda(\text{tr}\mathbf{E})\mathbf{I} + 2G\mathbf{E} \quad 3.19$$

Onde $\mathbf{T}$ é a matriz de tensões de Cauchy, $\mathbf{E}$ é a matriz de deformações, $\mathbf{I}$ é a matriz identidade de ordem 3 e $\text{tr}\mathbf{E}$ é o traço da matriz $\mathbf{E}$ ($\text{tr}\mathbf{E} = E_{11} + E_{22} + E_{33}$).

As constantes Λ e G são positivas e denominadas constantes de Lamé, características dos materiais elásticos. A constante G é definida como módulo de cisalhamento.

Além das constantes de Lamé, outras três constantes são de interesse no estudo dos materiais elásticos, sendo elas o módulo de elasticidade E , o coeficiente de Poisson ν e o módulo volumétrico K . Tais constantes se definem a partir de Λ e G conforme as seguintes equações.

$$\mathbf{E} = \frac{G(3\Lambda + 2G)}{\Lambda + G} \quad 3.20$$

$$\nu = \frac{\Lambda}{2(\Lambda + G)} \quad 3.21$$

$$K = \frac{3\Lambda + 2G}{3} \quad 3.22$$

Rearranjando as equações acima, podemos reescrevê-las da seguinte forma:

$$\Lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad 3.23$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad 3.24$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad 3.25$$

Ressalta-se que os materiais governados por esta teoria possuem uma importante propriedade. Deformações volumétricas só ocorrem se $\text{tr}T \neq 0$ e distorções só acontecem na presença de tensões cisalhantes. Sendo assim, para o melhor entendimento desta propriedade faz-se a dedução das equações para as partes esférica e desviadora da matriz tensão T , definidas a seguir:

$$T = T_d + T_e \quad 3.26$$

$$T_e = \left(\frac{\text{tr}T}{3} \right) I \quad 3.27$$

A partir da equação constitutiva para materiais elásticos lineares isotrópicos (equação 3.19), com as transformações matemáticas necessárias, obtemos:

$$T_e = 3KE_e \quad 3.28$$

$$T_d = 2GE_d \quad 3.29$$

Em que $E_e = \left(\frac{\text{tr}E}{3}\right)I$ é a parte esférica de E , que mede deformação volumétrica, e $E_d = E - E_e$ é a parte desviadora de E , que mede distorção.

Assim, a equação 3.19 pode ser reescrita conforme a equação 3.30:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_e + \mathbf{T}_d = 3k\mathbf{E}_e + 2G\mathbf{E}_d \quad 3.30$$

Os termos Λ, G, E, ν e K possuem interpretações físicas que são facilmente identificadas através de diversas solicitações, por exemplo, em um cubo constituído de material elástico linear isotrópico.

Em uma solicitação onde ocorra compressão ou extensão vertical, sem deformação lateral, obtém-se a interpretação física para Λ , que é o quociente entre a tensão horizontal e a deformação específica vertical. Em mecânica dos solos, o módulo edométrico M pode ser determinado no ensaio de adensamento e tem como valor $M = (\Lambda + 2G) = \frac{3K+4G}{3}$.

Se a solicitação no cubo for de compressão isotrópica, onde se aplicam tensões de magnitudes iguais nas três direções (estado hidrostático de tensões), é possível obter a interpretação física de K , que é o quociente entre a tensão aplicada e a deformação volumétrica decorrente.

No cisalhamento simples do cubo, obtém-se a constante G do material, denominada módulo de cisalhamento, através da relação entre tensão cisalhante e distorção específica.

Por último, as constantes ν e E são determinadas em solicitações de compressão ou extensão axial no cubo com demais tensões nulas. Neste caso, o quociente entre deformação horizontal e vertical é o coeficiente de Poisson ν e o quociente entre tensão e deformação vertical é o módulo de elasticidade E .

3.4 MODELO VISCOELÁSTICO TRIDIMENSIONAL DE KELVIN-VOIGT

O modelo viscoelástico tridimensional de Kelvin-Voigt é uma extensão do elemento unidimensional apresentado no item 3.2.2, em que o corpo de Kelvin-Voigt é formado pela associação em paralelo de um pistão de Newton com a mola de Hooke. Neste caso a equação 3.12 é a que rege o fenômeno viscoelástico.

Nota-se na equação 3.12 a existência de dois termos, sendo um elástico $[E \cdot \epsilon(t)]$ e outro viscoso $[\eta \cdot \dot{\epsilon}(t)]$.

Para fluidos, a equação tridimensional viscoelástica de Kelvin-Voigt tem sido expressa segundo a equação 3.31 (Ziegler, 1937; Malvern, 1969), onde só são consideradas as parcelas desviadoras elástica e viscosa.

$$\mathbf{T}_d = 2\mathbf{G}\mathbf{E}_d + 2\mathbf{H}_2\dot{\mathbf{E}}_d \quad 3.31$$

Porém, como para solos e resíduos sólidos urbanos esperam-se deformações volumétricas significativas, devem ser acrescidos os termos viscosos e elásticos relativos a essas deformações. Esses termos foram acrescidos com base na equação elástica 3.30. Com isso chega-se à equação tridimensional do modelo viscoelástico de Kelvin:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_e + \mathbf{T}_d = 3\mathbf{k}\mathbf{E}_e + 2\mathbf{G}\mathbf{E}_d + 3\mathbf{H}_1\dot{\mathbf{E}}_e + 2\mathbf{H}_2\dot{\mathbf{E}}_d \quad 3.32$$

Onde $[3\mathbf{k}\mathbf{E}_e + 2\mathbf{G}\mathbf{E}_d]$ são os termos elásticos e $[3\mathbf{H}_1\dot{\mathbf{E}}_e + 2\mathbf{H}_2\dot{\mathbf{E}}_d]$ os termos viscosos, e, $\dot{\mathbf{E}}_e$ e $\dot{\mathbf{E}}_d$ são respectivamente a parte esférica e desviadora da matriz velocidade de deformação $\dot{\mathbf{E}}$.

Desenvolvendo a equação 3.32, utilizando as definições $\mathbf{E}_e = \left(\frac{tr\mathbf{E}}{3}\right)\mathbf{I}$, $\mathbf{E}_d = \mathbf{E} - \mathbf{E}_e$, $\dot{\mathbf{E}}_e = \left(\frac{tr\dot{\mathbf{E}}}{3}\right)\mathbf{I}$ e $\dot{\mathbf{E}}_d = \dot{\mathbf{E}} - \dot{\mathbf{E}}_e$, chega-se à equação do modelo conforme a equação 3.33:

$$\mathbf{T} = \Lambda(tr\mathbf{E})\mathbf{I} + 2\mathbf{G}\mathbf{E} + \eta_1(tr\dot{\mathbf{E}})\mathbf{I} + \eta_2\dot{\mathbf{E}} \quad 3.33$$

Onde:

$$\Lambda = \left(k - \frac{2G}{3}\right) \quad 3.34$$

$$\eta_1 = \left(H_1 - \frac{2}{3}H_2\right) \quad 3.35$$

$$\eta_2 = 2.H_2 \quad 3.36$$

O objetivo desta pesquisa consiste em avaliar o modelo viscoelástico quanto à sua eficiência para prever as deformações ao longo do tempo nos RSU sob uma carga constante (fluência). Isto posto, será demonstrada posteriormente a dedução da equação 3.32 para o caso específico de fluência na compressão confinada. Os resultados do modelo serão comparados com os ensaios de campo e laboratório apresentados no item 4.

3.5 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS ELÁSTICOS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Conforme apresentado no item 3.4, o modelo viscoelástico tridimensional de Kelvin-Voigt envolve, além das constantes viscosas η_1 e η_2 , parâmetros geotécnicos elásticos como módulo de cisalhamento G , módulo volumétrico k e a constante de Lamé Λ , a qual pode ser determinada através do módulo Young E e do coeficiente de Poisson ν (equação 3.23).

Neste item serão apresentados valores dos parâmetros G , E e ν encontrados na literatura nacional e internacional. É importante ressaltar que esses parâmetros elásticos foram obtidos através de interpretação de ensaios adotando-se hipótese de comportamento elástico linear, ou seja, em que não se considerou comportamento viscoelástico. Logo, não se pode fazer uma comparação desses parâmetros com os parâmetros elásticos obtidos nos modelos viscoelásticos desta pesquisa, os quais serão apresentados nos itens 5 e 6.

3.5.1 Módulo de Cisalhamento (G)

O módulo de cisalhamento G pode ser determinado tanto por ensaios de laboratório como por ensaios de campo. O módulo também pode ser determinado através dos módulos de Poisson e de Young utilizando a equação 3.24 da teoria da elasticidade linear para materiais isotrópicos.

A seguir são apresentados resultados de ensaios tipo *crosshole*, *surface wave* e pressiométricos realizados em aterros sanitários brasileiros e estrangeiros.

Carvalho (1999) realizou um ensaio *crosshole* no aterro sanitário Bandeirantes na cidade de São Paulo. Para interpretação dos resultados, adotaram-se valores de peso específico de 8, 10 e 12 kN/m³. Os valores obtidos de G (Figura 3.13), crescentes com a profundidade, variaram entre 7,5 a 20 MPa. Observa-se que valores de G superiores foram obtidos a 1 m de profundidade, correspondentes à camada de cobertura de solo.

Figura 3.13: Módulos de cisalhamento G obtidos pelo ensaio *crosshole* no aterro sanitário Bandeirantes-SP (CARVALHO, 1999).

Dixon et al. (2006) apresentam resultados de ensaios pressiométricos realizados em dois aterros sanitários do Reino Unido. Os valores de G_i (módulo

de cisalhamento inicial) obtidos através do primeiro carregamento da célula do pressiômetro, onde é assumida a hipótese de comportamento elástico linear do resíduo, apresentam valores que variam de 0,7 a 19,0 MPa, conforme mostrado na Figura 3.14. Pode-se observar grande dispersão nos resultados nos valores de G_i e que a tendência de aumento com a profundidade não é evidente.

Figura 3.14: Módulos de cisalhamento inicial G_i obtidos pelo ensaio pressiométrico em aterros sanitários do Reino Unido (DIXON et al., 2006).

Os autores apresentam ainda valores do módulo cisalhante calculado no primeiro ciclo de carga-recarga para deformações de 0,0001 (G_s) dos testes pressiométricos e os comparam com os resultados obtidos pelo método *surface wave* (G_0). Os resultados são apresentados em função da profundidade na Figura 3.15. Observa-se uma grande dispersão de valores, porém com tendência a aumento de rigidez com a profundidade. Os valores um pouco menores obtidos pelo pressiômetro podem ser explicados pelo fato de que o módulo é calculado para deformações não tão pequenas como as induzidas por ondas superficiais. Os autores observam que as duas técnicas podem determinar diferentes módulos de rigidez, principalmente se houver anisotropia no maciço sanitário: o pressiômetro determinaria principalmente o módulo

cisalhante na direção horizontal e o *surface wave*, na vertical. A maioria dos valores, mais uma vez, concentra-se na faixa entre 5 e 30 MPa.

Figura 3.15: Módulos de cisalhamento G obtidos pelo método *surface wave* e comparados com os módulos G_s obtidos para deformações de 0,0001 no primeiro ciclo de carga-recarga da curva pressiométrica (DIXON et al., 2006).

Dixon et al. (2006) apresentam também valores de módulo de cisalhamento secante, calculados para deformações entre 0,0001 a 0,01, para quatro ciclos de carregamento-descarregamento, para lixo novo. Esses valores foram corrigidos para considerar o aumento de tensão efetiva média ao redor da cavidade durante o ensaio drenado (G_{scor}). Os valores de G_{scor} variaram na faixa de 5 a 30 MPa, sendo que para maiores deformações os valores diminuem, conforme apresentado na Figura 3.16.

Figura 3.16: Módulo de cisalhamento corrigido G_{scor} obtido pelo ensaio pressiométrico para deformações entre 0,0001 a 0,01 usando os ciclos de carga-descarga (DIXON et al., 2006).

Outros valores de G foram apresentados por Elk et al. (2014), obtidos por meio de ensaios do tipo *surface wave* realizados em um aterro sanitário de Madri, na Espanha. O ensaio foi feito em resíduos novos (até 4 anos) dispostos de forma não compactada, resultando em um peso específico determinado em campo de 5 kN/m^3 . Os valores de G aumentam com a profundidade, variando de 7,2 a 31 MPa, da superfície até 33 m de profundidade, conforme mostra a Figura 3.17.

Figura 3.17: Módulos de cisalhamento G obtidos pelo ensaio *surface wave* em função da profundidade para resíduo com peso específico de 5 kN/m^3 (ELK et al., 2014).

Segundo a teoria da elasticidade, pela equação 3.24, para se obter $G = 7,2 \text{ MPa}$, seria necessário um módulo de elasticidade E da ordem de 27 MPa , muito superior aos valores obtidos para RSU em campo.

3.5.2 Módulo de Young (E) e coeficiente de Poisson (ν)

O módulo de Elasticidade ou módulo de Young pode ser obtido em laboratório através de ensaios triaxiais ou edométricos. Em campo o módulo E pode ser obtido pelo ensaio *crosshole* ou por ensaios de placa. Da mesma forma, o coeficiente de Poisson ν pode ser obtido por ensaios triaxiais ou em campo também pelo ensaio *crosshole*.

Carvalho (1999) apresenta valores de E obtidos pelo ensaio *crosshole* executado no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo. Os valores aumentam de acordo com a profundidade, 2 a 10 metros, e foram calculados para peso específico variando entre 8 a 12 kN/m^3 .

Os valores de E e do coeficiente de Poisson ν obtidos no ensaio estão apresentados, respectivamente, na Figura 3.18 e na Figura 3.19.

Figura 3.18: Módulo de elasticidade E em função da profundidade obtido por ensaio *crosshole* no aterro Bandeirantes, São Paulo (CARVALHO, 1999).

Figura 3.19: Coeficiente de Poisson ν em função da profundidade obtido por ensaio *crosshole* no aterro Bandeirantes, São Paulo (CARVALHO, 1999).

Nota-se que os valores de E variam de 20 a 45 MPa, enquanto o coeficiente de Poisson ν apresenta um valor médio de 0,33.

Carvalho (1999) ainda apresenta valores para E e ν obtidos por ensaios triaxiais em laboratório. Os valores para o módulo de elasticidade inicial (E_0) variaram de 35 a 40 MPa, próximos aos obtidos pelo ensaio *crosshole*. Os ensaios triaxiais também apontaram valores do coeficiente de Poisson próximos aos obtido pelos ensaios de *crosshole* ($\nu = 0,33$). A partir de ensaios de compressão confinada, foi possível determinar os módulos de compressão confinada D ($D = \frac{\sigma_v}{\varepsilon_v}$) e, por meio da equação 3.37, determinou-se o módulo de elasticidade E .

$$E = \frac{D \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad 3.37$$

Os resultados estão apresentados na Figura 3.20, comparados com os módulos de elasticidade obtidos nos ensaios triaxiais a 20% de deformação axial. Os gráficos apresentam E em função do aumento da tensão octaédrica. Para o ensaio de compressão confinada, a tensão octaédrica foi calculada segundo a equação 3.38.

$$\sigma_{oct} = \frac{\sigma_v \cdot (1 + 2k_0)}{3} \quad 3.38$$

onde $k_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$.

Os valores de E se apresentaram na faixa de 0 a 5 MPa e apresentam boa aproximação nos dois ensaios.

(a)

(b)

(c)

Figura 3.20: Módulos de elasticidade obtidos por ensaios triaxiais e compressão confinada: (a) amostra T2A; (b) amostra T2B; (c) amostra T1B do aterro Bandeirantes, São Paulo (CARVALHO, 1999).

Outros valores de módulo de elasticidade E para resíduos sólidos urbanos foram obtidos por ensaios de placa por Campi (2011) em aterro sanitário de grande porte da região metropolitana de São Paulo. Foram realizados 11 ensaios em diferentes regiões do aterro e os resultados foram apresentados em gráficos de E em função dos estágios de tensões, conforme a Figura 3.21.

Figura 3.21: Módulos de elasticidade obtidos por ensaios de placa; (a) nos pontos P5, P6, P7, P8 e P9; (b) nos pontos P10, P11, P12, P13, P14 e P15 (CAMPI, 2011).

Os valores encontram-se em sua maioria entre 1 e 2,5 MPa. Ao contrário do comentado por Carvalho (1999), não se observou enrijecimento dos resíduos sólidos com o aumento das tensões aplicadas.

Manassero; Van Impe e Bouazza (1996) compilaram resultados de diversos ensaios de compressibilidade em RSU realizados por vários autores (Figura 3.22). Em linhas gerais, obteve-se que o módulo de elasticidade para os RSU varia entre 0,5 a 3 MPa.

Figura 3.22: Módulos de Elasticidades de RSU (MANASSERO; VAN IMPE e BOUAZZA, 1996)

Karimpour-Fard e Machado (2012) apresentaram valores do coeficiente de Poisson obtidos em ensaios triaxiais e de compressão confinada em amostras retiradas do Aterro Sanitário Metropolitano de Salvador, na Bahia. Os valores apresentados variaram na faixa de 0,35 a 0,49 e foram comparados com outros valores obtidos por diferentes autores conforme a Figura 3.23.

Figura 3.23: Valores de coeficiente de Poisson (KARIMPOUR-FARD e MACHADO, 2012)

Carvalho e Vilar (1998) apresentaram valores na faixa de 0,25 a 0,35 através de ensaios *crosshole* realizados no aterro sanitário Bandeirantes na cidade de São Paulo.

Através de ensaios *downhole*, Houston et al. (1995) obtiveram valores de ν entre 0,1 e 0,3 e decrescentes com a profundidade em um aterro sanitário no Arizona nos Estados Unidos. A Figura 3.24 apresenta o perfil obtido pelos autores.

Figura 3.24: Valores de coeficiente de Poisson (HOUSTON et al., 1995).

Nota-se uma grande variedade de valores obtidos por diferentes autores para o coeficiente de Poisson de resíduos sólidos urbanos, o que se explica pela grande heterogeneidade do material, condição de compactação, orientação das partículas, quantidade de matéria orgânica, entre outros.

3.5.3 Resumo dos Valores Encontrados

As Tabelas 3.1 a 3.3 apresentam um resumo dos parâmetros G , E e ν , obtidos por diversos autores e por diferentes tipos de ensaios, realizados em campo ou em laboratório. Além da faixa de valores de cada parâmetro são apresentados o tipo de ensaio, observações do ensaio e seus respectivos autores.

Tabela 3.1: Valores do módulo de cisalhamento G .

AUTOR	G (MPa)	ENSAIO	PROFUNDIDADE (m)	OBSERVAÇÕES:
CARVALHO (1999)	7.5 a 20	Crosshole	até 12	➤ Valores crescentes com a profundidade; ➤ $8 < \gamma < 12$ (kN/m³).
DIXON et al. (2006)	0.7 a 30	Pressiométrico	até 18	➤ Grande dispersão ➤ Valores iniciais e para deformações de 0,0001 no primeiro ciclo
ELK et al. (2014)	7.2 a 31	Surface wave	até 33	➤ Valores crescentes com a profundidade; ➤ $\gamma = 5$ kN/m³.

Tabela 3.2: Valores do módulo de elasticidade E .

AUTOR	E (MPa)	ENSAIO	PROFUNDIDADE (m)	OBSERVAÇÕES:
CARVALHO (1999)	20 a 45	Crosshole	até 12	➤ Valores crescentes com a profundidade; ➤ $8 < \gamma < 12$ (kN/m³).
CARVALHO (1999)	35 a 40	Triaxial	Laboratório	➤ E_0
	1 a 8			➤ Deformações superiores a 5%
	1 a 5			➤ Deformações superiores a 10%
CARVALHO (1999)	1 a 5	Compressão confinada	Laboratório	-
CAMPI (2011)	1 a 2,5	Ensaio de Placa	Ensaio feito na superfície	➤ Não se observou enrijecimento dos resíduos sólidos com o aumento das tensões
MANASSERO et al. (1996)	0,5 a 3	-	-	➤ Diversos autores ➤ Valores aumentam com o aumento do nível de tensões

Tabela 3.3: Valores do coeficiente de Poisson.

AUTOR	ν	ENSAIO	PROFUNDIDADE (m)	OBSERVAÇÕES:
CARVALHO (1999)	0,15 a 0,4	<i>Crosshole</i>	até 12	➤ Valor médio igual a 0,33.
CARVALHO (1999)	0,15 a 0,4	Triaxial	Laboratório	➤ Aumentam ligeiramente com o aumento das deformações axiais.
Machado e Fard (2012)	0,35 a 0,49	Triaxial e Compressão Confinada	Laboratório	-
Machado e Fard (2012)	0,1 a 0,49	Triaxial	Laboratório	➤ Compilação de resultados de laboratório e de outros autores.
Houston	0,1 a 0,3	<i>Downhole</i>	até 12	➤ Valores diminuem com o aumento da profundidade

Os valores do módulo de cisalhamento G estão entre 0,70 e 31 MPa, crescentes com a profundidade para os métodos de *crosshole* e *surface wave*. Nos ensaios pressiométricos, os valores são inferiores, com grande dispersão e sem uma tendência clara de variação em função da profundidade.

Os valores do coeficiente de Poisson variaram entre 0,1 e 0,49, sendo que os valores acima de 0,4 foram obtidos em ensaios laboratoriais com resíduos sólidos urbanos possivelmente com alto grau de saturação.

Os valores do módulo de elasticidade E estão entre 1 e 45 MPa. Observa-se na Tabela 3.2 que os maiores valores de E , entre 20 e 40 MPa, referem-se ao E_0 obtido em ensaios triaxiais e em ensaios *crosshole* por Carvalho (1999). Já os valores obtidos por Carvalho (1999) nos ensaios triaxiais para deformações maiores que 10%, entre 1 e 5 MPa, são compatíveis com aqueles apresentados por Campi (2011) e Manassero et al. (1996).

Os parâmetros elásticos apresentados neste item foram resultados de ensaios de campo e laboratório realizados com resíduos distintos quanto à idade, forma de compactação, teor de umidade, peso específico, teor de matéria orgânica, entre outros.

Além disso, os diversos tipos de ensaio utilizam diferentes formas de aplicação de carregamentos, às quais a elasticidade linear é relacionada para interpretar os resultados e por meio desses calcular os parâmetros elásticos do material solicitado. Como os RSU não têm realmente comportamento elástico linear, não podem responder com os mesmos parâmetros elásticos G , E e ν às solicitações impostas por ensaios de placa, pressiométrico, de propagação de ondas, de compressão triaxial e de compressão confinada. Não se pode esperar, portanto, que os resultados de diferentes ensaios determinem parâmetros iguais entre si, mesmo se os RSU fossem exatamente iguais quanto à composição, idade e forma de compactação.

Outro aspecto a ser considerado é a hipótese que os parâmetros elásticos não variam durante o ensaio, mesmo sabendo que a hipótese não condiz com a realidade. Por exemplo, sabe-se que ao final de um ensaio de compressão confinada os módulos de elasticidade e de cisalhamento apresentarão maiores valores do que no início do ensaio, justamente pelo fato do material não ser verdadeiramente elástico.

Reforça-se novamente que esses parâmetros elásticos, que partem da hipótese de comportamento elástico linear, foram aqui apresentados apenas para indicar a grande variação de valores encontrados na bibliografia em função dos diferentes tipos de ensaios, composição dos materiais investigados, condições experimentais etc., e que não serão comparados com os parâmetros elásticos obtidos nos dois modelos viscoelásticos estudados nesta pesquisa.

4. METODOLOGIA

4.1 MODELO TRIDIMENSIONAL VISCOELÁSTICO DE KELVIN-VOIGT APLICADO PARA COMPRESSÃO CONFINADA (1º MODELO)

Neste item é apresentada a simplificação do modelo tridimensional viscoelástico de Kelvin-Voigt para representar a evolução das deformações verticais ao longo do tempo para compressão sem deformação lateral.

As matrizes tensão e deformação para a compressão sem deformação lateral, segundo uma base ortonormal direcionada nas direções principais, são descritas a seguir.

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_v \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix}$$

Sendo σ_h e σ_v as tensões horizontal e vertical, respectivamente, e a a deformação vertical.

Separando as matrizes T e E nas partes desviadoras e esféricas, temos:

$$T_e = \begin{bmatrix} \frac{2\sigma_h + \sigma_v}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2\sigma_h + \sigma_v}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2\sigma_h + \sigma_v}{3} \end{bmatrix} \quad T_d = T - T_e = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_h - \sigma_v}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_h - \sigma_v}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2\sigma_v - 2\sigma_h}{3} \end{bmatrix}$$

$$E_e = \begin{bmatrix} \frac{a}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{a}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{a}{3} \end{bmatrix} \quad E_d = E - E_e = \begin{bmatrix} -\frac{a}{3} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{a}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2a}{3} \end{bmatrix}$$

A partir das matrizes de deformação esférica (E_e) e desviadora E_d , podem ser descritas as matrizes velocidade de deformação desviadora ($\dot{E}_d$) e esférica ($\dot{E}_e$).

$$\dot{E}_e = \begin{bmatrix} \frac{\dot{a}}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\dot{a}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\dot{a}}{3} \end{bmatrix} \quad \dot{E}_d = \dot{E} - \dot{E}_e = \begin{bmatrix} -\frac{\dot{a}}{3} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\dot{a}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2\dot{a}}{3} \end{bmatrix}$$

Onde $\dot{a}$ representa a velocidade com que o material se deforma.

Com isso, podemos inserir as componentes desviadoras e esféricas das matrizes T , E e $\dot{E}$ nas equações desviadora e esférica do modelo tridimensional de Kelvin (equação 3.32).

Equação de T_e , parte esférica do modelo:

$$T_e = 3KE_e + 3H_1\dot{E}_e \quad 4.1$$

$$\begin{bmatrix} \frac{2\sigma_h + \sigma_v}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2\sigma_h + \sigma_v}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2\sigma_h + \sigma_v}{3} \end{bmatrix} = 3K \begin{bmatrix} \frac{a}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{a}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{a}{3} \end{bmatrix} + 3H_1 \begin{bmatrix} \frac{\dot{a}}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\dot{a}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\dot{a}}{3} \end{bmatrix}$$

Equação de T_d , parte desviadora do modelo:

$$T_d = 2GE_d + 2H_2\dot{E}_d \quad 4.2$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\sigma_h - \sigma_v}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_h - \sigma_v}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2\sigma_v - 2\sigma_h}{3} \end{bmatrix} = 2G \begin{bmatrix} -\frac{a}{3} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{a}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2a}{3} \end{bmatrix} + 2H_2 \begin{bmatrix} -\frac{\dot{a}}{3} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\dot{a}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2\dot{a}}{3} \end{bmatrix}$$

Resultam três equações, sendo uma referente à parte esférica (equação 4.3) e duas à parte desviadora (equações 4.4 e 4.5).

$$\frac{2\sigma_h + \sigma_v}{3} = 3K \frac{a}{3} + 3H_1 \frac{\dot{a}}{3} \quad 4.3$$

$$\frac{\sigma_h - \sigma_v}{3} = -2G \frac{a}{3} - 2H_2 \frac{\dot{a}}{3} \quad 4.4$$

$$\frac{2\sigma_v - 2\sigma_h}{3} = 4G \frac{a}{3} + 4H_2 \frac{\dot{a}}{3} \quad 4.5$$

Somando-se a equação 4.3 com a equação 4.5, obtém-se a equação da compressão axial sem deformação lateral:

$$\sigma_v = a \left(\frac{3K+4G}{3} \right) + \dot{a} \left(\frac{3H_1+4H_2}{3} \right) \quad 4.6$$

Para o caso de fluência, analisa-se o comportamento das deformações verticais no decorrer do tempo devido à aplicação de uma tensão vertical constante ($\sigma_v = \sigma_{v0}$).

$$\sigma_{v0} = a \left(\frac{3K+4G}{3} \right) + \dot{a} \left(\frac{3H_1+4H_2}{3} \right) \quad 4.7$$

Para a solução da equação diferencial 4.7, temos de utilizar um recurso matemático, em que a soma da solução homogênea (indicada como índice $_H$) com a solução particular (indicada como índice $_P$) resulta na solução da equação diferencial.

A equação homogênea é:

$$\left(\frac{3K+4G}{3H_1+4H_2} \right) a + \dot{a} = 0 \quad 4.8$$

Sua solução geral é:

$$a_H(t) = A. e^{\left(-\frac{3K+4G}{3H_1+4H_2}.t \right)} \quad 4.9$$

Onde A é uma constante.

Se a solução particular for uma constante k ,

$$a_p(t) = k \Rightarrow \dot{a}_p(t) = 0 \quad 4.10$$

Temos:

$$k = a_p(t) = \frac{3\sigma_{v0}}{3K+4G} \quad 4.11$$

A solução geral da equação diferencial 4.7 é, portanto:

$$a(t) = a_H(t) + a_p(t) \quad 4.12$$

$$a(t) = A \cdot e^{\left(-\frac{3K+4G}{3H_1+4H_2} \cdot t\right)} + \frac{3\sigma_{v0}}{3K+4G} \quad 4.13$$

Em $t = 0$, $a(0) = a_0$, logo:

$$a_0 = A + \frac{3\sigma_{v0}}{3K+4G} \Rightarrow A = a_0 - \frac{3\sigma_{v0}}{3K+4G} \quad 4.14$$

Portanto, sabendo-se que $a_0 = 0$, a equação do modelo tridimensional de Kelvin-Voigt que apresenta a variação da deformação no tempo (fluência) é:

$$a(t) = \left[-\frac{3\sigma_{v0}}{3K+4G}\right] \cdot e^{\left(-\frac{3K+4G}{3H_1+4H_2} \cdot t\right)} + \frac{3\sigma_{v0}}{3K+4G} \quad 4.15$$

Como se pode observar, a equação 4.15 apresenta as constantes elásticas G e K , as constantes viscosas H_1 e H_2 e a tensão axial constante de fluência σ_{v0} .

Para a fluência em compressão sem deformação lateral, o termo $(3H_1 + 4H_2)$ composto pelos parâmetros viscosos H_1 e H_2 será simplificado como sendo o parâmetro $H_3 = 3H_1 + 4H_2$. Assim, resulta a seguinte equação:

$$a(t) = \left[-\frac{3\sigma_{v0}}{3K+4G} \right] \cdot e^{\left(-\frac{3K+4G}{H_3} \cdot t \right)} + \frac{3\sigma_{v0}}{3K+4G} \quad 4.16$$

Sabe-se que, pela teoria da elasticidade, o módulo edométrico pode ser escrito em função de K e G $\left(M = \frac{3K+4G}{3} \right)$. A equação 4.16 pode ser assim reescrita:

$$a(t) = \frac{\sigma_{v0}}{M} \left[1 - e^{-\frac{3M}{H_3} \cdot t} \right] \quad 4.17$$

Observa-se que equação 4.17, deduzida para fluência na compressão confinada a partir do modelo viscoelástico tridimensional de Kelvin-Voigt, apresenta, como não poderia deixar de ser, semelhança com a equação 3.14 da fluência do modelo unidimensional de Kelvin-Voigt.

Os coeficientes das duas equações diferem, contudo, pois na equação 3.14 as deformações unidimensionais não dependem das respostas às solicitações decorrentes das outras direções principais.

Este modelo viscoelástico foi utilizado para representar as curvas de deformação ao longo do tempo de ensaios de campo e laboratório apresentadas no item 4.3. Como se verá adiante (item 5), os resultados obtidos não foram satisfatórios. Procurou-se desenvolver então um segundo modelo viscoelástico pela análise qualitativa de diversas combinações de modelos reológicos de Hooke e Newton, até chegar ao modelo proposto no item 4.2.

4.2 MODELO TRIDIMENSIONAL VISCOELÁSTICO COMPOSTO DE DOIS ELEMENTOS DE KELVIN-VOIGT LIGADOS EM SÉRIE APLICADO PARA COMPRESSÃO CONFINADA (2º MODELO)

Como o modelo tridimensional de Kelvin-Voigt proposto no item 4.1 não representou bem as curvas de deformação em função do tempo dos ensaios utilizados, com base na forma das curvas reais, deduziu-se um novo modelo

composto pela ligação em série de dois elementos reológicos de Kelvin-Voigt, conforme apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1: Elementos do modelo reológico de Kelvin-Voigt ligados em série.

No modelo apresentado na Figura 4.1, a deformação total do conjunto ligado em série é a soma das deformações de cada elemento de Kelvin-Voigt.

Portanto, neste segundo modelo viscoelástico tridimensional baseado na ligação em série de dois elementos distintos de Kelvin-Voigt, a evolução no tempo das deformações por fluência em compressão confinada pode ser calculada pela equação 4.18, que representa a soma da equação 4.17 para os dois elementos.

$$a(t) = a_1(t) + a_2(t) = \frac{\sigma_{v0}}{M_1} \left[1 - e^{-\frac{3M_1}{H_4}t} \right] + \frac{\sigma_{v0}}{M_2} \left[1 - e^{-\frac{3M_2}{H_5}t} \right] \quad 4.18$$

Há agora duas variáveis elásticas (M_1) e (M_2), correspondentes por analogia às molas de Hooke, e duas variáveis viscosas (H_4) e (H_5), correspondentes por analogia aos pistões de Newton.

Este modelo viscoelástico também foi utilizado para representar as curvas de deformação ao longo no tempo de ensaios de campo e laboratório apresentadas no item 4.3.

4.3 DADOS DE COMPRESSÃO CONFINADA DE RSU

Neste item são apresentados alguns resultados de compressão confinada de resíduos sólidos urbanos obtidos por ensaios realizados tanto em campo como em laboratório. Esses resultados, obtidos na literatura nacional e internacional, são utilizados para aferir se os modelos viscoelásticos propostos possibilitam uma boa representação do comportamento dos RSU observado nos ensaios.

Os dados laboratoriais provêm de ensaios edométricos (ou ensaios de compressão sem deformação lateral, ou ainda, ensaios de compressão confinada). Os dados de campo são originários de ensaios de carregamento por aterro experimental ou por placa, em que foi gerada e monitorada uma condição de compressão confinada em algum local do maciço sanitário.

Nos casos estudados, considerou-se que, pela idade dos resíduos e pela duração dos ensaios, a componente dos recalques devida à biodegradação era desprezível em relação aos recalques devidos ao carregamento.

4.3.1 COMPRESSÃO CONFINADA EM CAMPO – VAN ELK ET AL. (2014)

Van Elk et al. (2014) apresentaram ensaios de campo realizados em um aterro sanitário de grande porte na cidade de Madrid, Espanha. O aterro controlado Valdemingómez ocupa uma área de 110 ha distante 20 km do centro de Madrid e serviu essa cidade e dois outros pequenos municípios vizinhos de 1978 a 2000, com uma produção média diária de 3.000 t de RSU, compreendendo lixo doméstico, público e comercial.

Os resíduos eram compostos de 59% de matéria orgânica putrescível, 4% de metais, 8% de vidros, 14% de plásticos, 6% de papel e papelão e 9% de outros. Foram dispostos ao longo dos anos sem compactação e seu peso específico foi estimado em 5 kN/m³.

A espessura da massa de resíduos atinge o valor máximo de 33 m. Ensaios geofísicos indicaram a existência de camadas de diferente deformabilidade, o que é consistente com a variabilidade da idade dos resíduos, a distribuição do

teor de umidade (variando de 13% a 70% com alguns bolsões de lixiviado) e a presença de coberturas intermediárias de solos. A rigidez aumenta com a profundidade, provavelmente devido à compressão sob peso próprio. A inspeção visual da camada superior revelou RSU em estágio avançado de decomposição, apesar da idade máxima de 4 anos.

Um dos ensaios realizados consistiu no monitoramento de recalques da massa de resíduos por meio de duas linhas de medidores de recalques posicionadas sob um aterro de sobrecarga de solo compactado, construído exclusivamente para a pesquisa. O aterro de sobrecarga, de dimensões de base de 20 m x 40 m e altura de 4 m, resultou em uma tensão de 64 kPa sobre uma coluna de RSU de 33 m de espessura. Os recalques foram monitorados ao longo de aproximadamente 600 dias. A Figura 4.2 apresenta os resultados dos recalques em função do tempo das duas linhas de medidores de recalques.

(a)

(b)

Figura 4.2: Monitoramento das duas linhas de recalque: (a) seção 1 (b) seção 2 (VAN ELK et al., 2014).

Para esta pesquisa apenas o ponto 12 será objeto de estudo para o ajuste dos modelos, pois este se encontra no centro do aterro de sobrecarga, com a hipótese de que nesta região há apenas deslocamento na direção vertical.

Os recalques imediatos sob o centro do aterro (ponto 12 de cada linha), desenvolvidos até 7 dias após a construção do aterro a uma velocidade de 64 mm/dia, foram de cerca de 0,50 m, enquanto os recalques de longo prazo, devidos a compressão secundária por carregamento e biodegradação, atingiram 2,00 m com velocidade de 3,6 mm/dia e representaram 55% dos recalques totais medidos.

4.3.2 COMPRESSÃO CONFINADA EM CAMPO – CAMPI (2011)

Campi (2011) executou ensaios de placa no CGR (Centro de Gerenciamento de Resíduos) Itapevi, um aterro sanitário de grande porte na Região Metropolitana de São Paulo. O aterro sanitário localiza-se a 42 km da cidade de São Paulo, tem uma área de operação de 100.180 m² e atende a 8 municípios desde 2003, recebendo 1.200 t diárias de RSU com permissão para codisposição de resíduos industriais não perigosos.

Os resíduos são compostos de aproximadamente 57% de matéria orgânica putrescível, 2% de metais, 1% de vidros, 16% de plásticos, 15% de papel, papelão e 9% de outros. São compactados com trator de esteiras e atingem peso específico médio de 11 kN/m³.

Os ensaios foram realizados em regiões diferentes do aterro para caracterizar o comportamento geomecânico dos resíduos novos e antigos. As áreas mais antigas, contudo, têm resíduos industriais codispostos, resultando em uma rigidez maior do que a dos RSU. Decidiu-se, portanto, utilizar dados dos ensaios realizados em regiões de deposição mais recente.

Alguns ensaios foram mais longos e forneceram curvas de recalque em função do tempo. A Figura 4.3 apresenta os recalques dos ensaios dos pontos P6, P7, P8, P9, P10 e P11, realizados sobre resíduos novos, para o carregamento de 6 tf. Os recalques de cada estágio foram medidos para períodos de 30 minutos,

com exceção do ponto P11, que ficou sob carga constante de 6 tf durante 8 horas, possibilitando o estudo da fluência nesta pesquisa.

Figura 4.3: Curvas de recalque versus tempo para uma carga constante de 6 tf nos pontos P6, P7, P8, P9, P10 e P11 (CAMPI, 2011).

Verifica-se que as deformações nos RSU não cessam mantendo-se um estágio de carregamento relativamente baixo por um longo período de tempo, conforme ocorreu para o P11. Os pontos com recalques semelhantes ao P11 nos tempos iniciais sob a carga de 6 tf são o P7, P8 e P9. No estágio normal de 30 minutos, estes pontos recalcam respectivamente 7,66 mm, 2,26 mm e 4,33 mm. Para o mesmo estágio de carregamento mantido por 8 horas, o P11 apresentou recalque de 28,12 mm, mais de 3,5 vezes o recalque do P7 e mais de 12 vezes o recalque do P8 (CAMPI, 2011).

A curva de recalque em função do tempo do estágio de carregamento de 6 tf do ensaio de placa P11 de Campi (2011) foi utilizada para o ajuste do modelo de Kelvin-Voigt, admitindo-se deformação lateral nula para esse tipo de solicitação. Foi aplicada uma tensão constante na placa de 119,4 kPa por oito horas. A placa possuía 0,80 m de diâmetro e as deformações foram calculadas dividindo-se os deslocamentos medidos por 0,80 m, valor adotado como altura

inicial da massa de resíduos solicitada pelo carregamento da placa. Considerou-se com base na teoria da elasticidade que, sob o centro da placa, menos do que 10% do carregamento superficial atinge profundidades superiores à equivalente ao diâmetro da placa (bulbo de tensões igual a 10% do carregamento superficial).

4.3.3 COMPRESSÃO CONFINADA EM LABORATÓRIO – CARVALHO (1999)

Carvalho (1999) apresenta resultados de ensaios de compressão confinada realizados com amostras deformadas retiradas do aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo e recompostas em laboratório.

As amostras foram coletadas em furos de tradagem de 0 a 18 metros de profundidade e misturadas para formar uma amostra representativa.

Os resíduos eram compostos de aproximadamente 55% de matéria orgânica putrescível, 6% de metais, 3% de vidros, 17% de plásticos, 2% de papel, papelão e 17% de outros.

Os ensaios foram realizados com amostras de RSU com pesos específicos de 8, 10, 12 e 14 kN/m³. Os corpos-de-prova para os ensaios foram moldados manualmente no seu teor de umidade natural em seis camadas levemente comprimidas, resultando na altura de 0,285 m, em um consolidômetro de 36,5 cm de diâmetro por 38,5 cm de altura.

Algumas das curvas de deformação axial versus tempo obtidas em cada estágio de carregamento do ensaio foram escolhidas para comparação com a curva gerada pela equação viscoelástica de Kelvin-Voigt, simplificada para fluência em compressão confinada.

A Figura 4.4 apresenta um exemplo entre as diversas curvas de cada estágio de carregamento dos ensaios de compressão confinada lateralmente realizados por Carvalho (1999). Cada carregamento durou aproximadamente 4 dias.

Figura 4.4: Curva de deformação axial ao longo do tempo para o estágio de carga de 80kPa em uma amostra com peso específico inicial de 8 kN/m³ (CARVALHO, 1999).

Foram utilizados nesta pesquisa os resultados dos ensaios com uma amostra compactada a 8 kN/m³ nos estágios de carregamento de 40, 80 e 160 kPa, para englobar as tensões aplicadas pelo aterro compactado no trabalho de Van Elk et al. (2014) e da placa no trabalho de Campi (2011).

4.3.4 COMPRESSÃO CONFINADA EM LABORATÓRIO – HOSSAIN et al. (2009)

Hossain et al. (2009) desenvolveram uma série de ensaios edométricos com RSU para avaliar os resultados dos parâmetros de compressão em diferentes amostras de RSU, variando o tamanho das partículas constituintes das amostras e também o diâmetro do equipamento de ensaio. Os autores chamam de fator r o quociente entre o tamanho do comprimento da maior partícula de RSU e o diâmetro do equipamento a ser utilizado no ensaio.

Os resíduos domiciliares foram coletados em uma estação de transbordo e manipulados granulometricamente. O grau de decomposição foi estimado pela razão $(C+H)/L$, sendo C, H e L, respectivamente celulose, hemicelulose e lignina, a qual variou entre 1,79 e 0,38, do lixo menos para o mais decomposto.

As amostras para ensaio resultaram em um peso específico médio de 11,8 kN/m³. Na Figura 4.5 são apresentados os resultados dos recalques ao longo do tempo de duas amostras, com fatores r de 0,13 e 0,30.

Figura 4.5: Comparação dos recalques de duas amostras com diferentes fatores r , submetidas a ensaio edométrico com diâmetro de 300 mm (HOSSAIN et al., 2009).

Observam-se na Figura 4.5 grandes recalques imediatos, de 27% para a amostra de fator $r = 0,30$ e 32% para a amostra de fator $r = 0,13$. Nota-se ainda que o recalque imediato da amostra com fator $r = 0,13$ é maior do que a de fator $r = 0,30$, pois a preparação de amostras com menores partículas compreende a separação de materiais de reforço (plásticos, têxteis e papéis) gerando maior compressibilidade do RSU, o que foi observado em todos os ensaios realizados.

Para o ajuste da equação viscoelástica, apenas a amostra com fator $r = 0,13$ foi utilizada. O ensaio foi realizado com carga inicial constante de 94 kPa e a amostra, com 300 mm de diâmetro e 102 mm de altura, permaneceu sob estado de fluência durante 21 dias aproximadamente.

Para a análise das deformações ao longo do tempo foi descontado o recalque imediato, de 32,2%, sendo então considerada a altura inicial da amostra de 69,16 mm.

4.4 APLICAÇÕES DOS MODELOS NA SIMULAÇÃO DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO CONFINADA

Aplicou-se o modelo viscoelástico tridimensional de Kelvin-Voigt aplicado (item 4.1) para simulação de ensaios de compressão confinada de laboratório e de campo em RSU (item 4.3), comparando-se os resultados teóricos com os resultados dos ensaios reais.

Considera-se nesta pesquisa que em todos os casos estudados os recalques por sobrecarga se desenvolveram exclusivamente por elasticidade e viscosidade, sendo desprezível a parcela de recalque por biodegradação da matéria orgânica contida nos resíduos.

No primeiro estudo, VAN ELK et al. (2014) comentam que os resíduos, apesar de dispostos em até 4 anos, já se encontravam bastante degradados, ou seja, grande parcela da biodegradação já havia sido desenvolvida. Ainda sim, deve-se lembrar que o monitoramento dos recalques durou 600 dias, podendo haver alguma contribuição da biodegradação, mesmo que na fase metanogênica desacelerada, na compressão.

O ensaio de placa de CAMPI (2011) também foi realizado sobre resíduo considerado novo pelo autor em comparação com outras áreas do aterro sanitário, porém o setor de realização do ensaio já apresentava cobertura de solo compactado, indicando que a biodegradação poderia estar num estágio avançado, além de que o ensaio só teve duração de 8 horas.

Os resíduos coletados por CARVALHO (1999) foram retirados de um furo de trado de uma profundidade de 18 metros em uma área encerrada do aterro sanitário Bandeirantes. O material retirado do furo foi misturado para compor as amostras utilizadas nos ensaios, ou seja, trata-se de material que já havia

passado por grande parcela de biodegradação. Além disso, o ensaio foi realizado em quatro dias.

HOUSSAIN et al. (2009) utilizaram resíduos frescos, porém não observaram comportamentos distintos nos ensaios entre amostras de diferentes graus de decomposição. Além disso, os autores comentam que a biodegradação só teve início efetivamente após 10 mil minutos do início do ensaio de compressão confinada.

Portanto, considera-se que nos casos estudados os recalques devido ao *creep* são preponderantes e podem ser bem representados pelo modelo viscoelástico.

Para a aplicação do modelo, foram estimados os parâmetros necessários por meio de dois processos, detalhados nos itens 4.4.1 e 4.4.2.

A qualidade da previsão pelo modelo da evolução da deformação vertical em função do tempo foi estimada visualmente e por meio do erro e do coeficiente de determinação, apresentados no item 4.4.4.

Como os resultados não foram satisfatórios, desenvolveu-se o segundo modelo viscoelástico, composto por dois elementos de Kevin-Voigt (item 4.2), e repetiu-se o processo de estimar parâmetros, aplicar o modelo aos casos de estudo e confrontar os resultados previstos pelo modelo com os medidos em laboratório ou campo.

4.4.1 Estimativa dos parâmetros do primeiro modelo por derivação da equação constitutiva

O primeiro modelo é representado pela equação 4.17, que apresenta os parâmetros de M e H_3 .

Quando o tempo (t) na equação 4.17 tende ao infinito, tem-se:

$$a(\infty) = y = \frac{\sigma_{v0}}{M} \quad 4.19$$

Determinando-se na curva experimental o valor y , apresentado na Figura 4.6, e com σ_{v0} conhecido, pode-se extrair um valor de M inicial para o ajuste do modelo.

Para determinação de H_3 , podemos derivar a equação 4.17, e calcular no ponto $t=0$:

$$\dot{a}(t) = \frac{\sigma_{v0}}{M} (-1) \cdot -\frac{3M}{H_3} e^{-\frac{3M}{H_3} \cdot t} \quad 4.20$$

e para $t = 0$ temos:

$$\dot{a}(0) = \frac{3\sigma_{v0}}{H_3} \quad 4.21$$

Sendo assim pode-se estimar, a partir dos primeiros pontos da curva experimental, o valor de $H_3 = \frac{3\sigma_{v0}}{\dot{a}(0)=tg\alpha}$, sendo α o ângulo formado entre a tangente da curva no ponto zero e o eixo das abscissas.

Figura 4.6: Croqui demonstrativo para determinação de $M = \frac{\sigma_{v0}}{y}$ e $H_3 = \frac{3\sigma_{v0}}{tg\alpha}$ a partir da curva experimental.

Os ajustes segundo este método se mostraram de baixa qualidade para todos os casos investigados, já indicando que o primeiro modelo não é apropriado para descrever o comportamento de fluência dos RSU. Mesmo assim, procurou-se ainda uma segunda forma de ajuste do primeiro modelo aos dados de compressão confinada de RSU.

4.4.2 Estimativa dos parâmetros do primeiro modelo por minimização do erro

Neste caso utilizou-se a equação 4.16, variando-se os parâmetros elásticos até ser obtido o melhor ajuste da curva teórica aos dados experimentais, avaliado tanto pela melhor representação visual, como por meio da minimização do erro e do coeficiente de determinação.

Os parâmetros E e ν foram inicialmente estimados pelo melhor ajuste visual do modelo aos pontos experimentais. Os parâmetros G e K foram calculados pelas equações 3.24 e 3.25, respectivamente, em função dos valores adotados de E e ν .

O módulo edométrico M pode também ser calculado a partir dos parâmetros G e K pela teoria da elasticidade, $\left(M = \frac{3K+4G}{3}\right)$.

Para estimar o coeficiente de viscosidade H_3 , adotaram-se diferentes valores para este parâmetro e procurou-se o melhor ajuste do modelo às curvas de recalque ao longo do tempo em compressão confinada para os ensaios de laboratório e campo selecionados.

Para os dados de Van Elk et al. (2014), Campi (2011) e Hossain et al. (2009), fixaram-se valores de ν dentre os reportados com mais frequência na literatura (0,15, 0,20, 0,30 e 0,40), e para cada caso, variou-se o valor de E de modo a se obter um recalque final próximo ao medido, minimizando o erro. Os valores de módulo de cisalhamento e módulo de deformabilidade foram determinados pelas equações da teoria da elasticidade, enquanto o coeficiente de viscosidade H_3 foi ajustado para que o erro determinado entre os pontos monitorados de campo e a curva gerada pelo modelo fosse o menor possível.

Decidiu-se também fazer uma análise de sensibilidade do modelo para E , ν e H_3 separadamente para os dados de Van Elk et al. (2014). Fixando-se o valor do coeficiente de Poisson em 0,20 e do coeficiente H_3 em 460.000 kPa.dia, variou-se o valor do módulo de elasticidade E . Em seguida, fixando-se o coeficiente de Poisson em 0,20 e o módulo de elasticidade em 1000 kPa, variou-se o valor do coeficiente de viscosidade H_3 . Por último, fixando-se o

valor de 1000 kPa para E e 460.000 kPa.dia para o H_3 , variou-se o valor do coeficiente de Poisson.

No caso de Carvalho (1999), para os três carregamentos, foi utilizado coeficiente de Poisson igual 0,33, valor determinado em ensaios *crosshole* em campo. Variaram-se então o módulo de elasticidade e coeficiente de viscosidade H_3 para obter o menor erro. A altura inicial do corpo de prova foi corrigida para cada estágio de carregamento, sendo que a amostra já havia sofrido compressão dos carregamentos anteriores.

4.4.3 Estimativa dos parâmetros do segundo modelo

Os parâmetros elásticos (M_1 e M_2) e viscosos (H_4 e H_5) contidos neste modelo foram ajustados pela melhor aproximação visual do modelo com a curva experimental e pela minimização do erro e do coeficiente de determinação.

Em seguida, uma segunda tentativa de estimativa dos parâmetros foi feita com a condição $M_1 = M_2$ e variando H_4 e H_5 de modo a obter o melhor ajuste aos pontos experimentais.

4.4.4 Qualidade dos ajustes

Para a avaliação da qualidade dos ajustes dos modelos estudados foram utilizadas duas equações:

1. Equação do erro:

$$Erro = \frac{\sqrt{\sum(v-v_c)^2}}{\sqrt{\sum(v)^2}} \quad 4.22$$

Onde:

v é o valor da deformação medida em campo ou laboratório no tempo t ;

v_c é o valor da deformação calculada pelo modelo no tempo t ;

Esta equação é sugerida por Nascentes (2003) para ajuste de curvas experimentais em ensaios geoambientais.

2. Equação do coeficiente de determinação (r^2):

$$r^2 = 1 - \frac{\sum(v_c - v)^2}{\sum(v - \bar{v})^2} \quad 4.23$$

Onde:

$\bar{v}$ é o valor da média das deformações medidas em campo ou laboratório;

v é o valor da deformação medida em campo ou laboratório no tempo t ;

v_c o valor da deformação calculada pelo modelo no tempo t .

5. RESULTADOS DO MODELO TRIDIMENSIONAL VISCOELÁSTICO DE KELVIN-VOIGT APLICADO PARA COMPRESSÃO CONFINADA (1º MODELO)

5.1 RESULTADOS A PARTIR DOS PARÂMETROS M e H_3 ESTIMADOS ATRÁVES DOS PONTOS EXPERIMENTAIS:

O módulo edométrico M foi estimado pelo quociente entre a carga fixa de fluência (σ_{v0}) e o valor final de deformação conforme a equação 4.19. Já o parâmetro viscoso (H_3) foi determinado pelo quociente entre a tensão vertical constante (σ_{v0}) e a tangente do ângulo formado pela reta tangente à curva experimental no ponto $t=0$ e o eixo das abscissas, conforme equação 4.21.

A Figura 5.1 apresenta a previsão do modelo com os parâmetros obtidos comparada à curva experimental de campo de Van Elk et al. (2014).

Figura 5.1: Ajuste do 1º modelo viscoelástico a partir da estimativa dos parâmetros M e H_3 pela curva experimental de VAN ELK et al. (2014).

Nota-se um ajuste de pouca qualidade, em função, principalmente, do parâmetro H_3 estimado a partir dos pontos iniciais da curva. As deformações iniciais foram consideráveis, resultando em uma tangente aos pontos iniciais muito elevada e, portanto, na estimativa de um baixo valor para o parâmetro

H_3 . Sendo assim o modelo prevê recalques muito maiores que os recalques reais durante quase todo o tempo do ensaio, só coincidindo com as duas primeiras medidas e com a última.

Outro exemplo deste primeiro método de estimativa de parâmetros, agora com um ensaio de laboratório de compressão confinada de Carvalho (1999), é apresentado na Figura 5.4.

Figura 5.2: Ajuste do 1º modelo viscoelástico a partir da estimativa dos parâmetros M e H_3 pela curva experimental de CARVALHO (1999).

Novamente o parâmetro H_3 foi subestimado resultando em recalques previstos muito superiores aos reais em grande parte do ensaio.

Os dois exemplos mostram que o modelo não se apresentou representativo do comportamento dos RSU. Mesmo assim, tentou-se novamente o ajuste do modelo estimando os parâmetros por minimização de erro.

5.2 COMPRESSÃO CONFINADA EM CAMPO – VAN ELK et al. (2014)

A Figura 5.3 apresenta os resultados do ajuste do modelo viscoelástico aos dados de Van Elk et al. (2014). Para 4 valores de ν (0,15, 0,20, 0,30 e 0,40) foram determinados os valores de E e do coeficiente de viscosidade H_3 que

representam melhor a evolução das deformações em função do tempo obtidos em campo. A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros utilizados nas quatro simulações e os erros correspondentes.

Figura 5.3: Ajuste do modelo viscoelástico aos recalques de campo de Van Elk et al. (2014) para diferentes valores de coeficiente de Poisson.

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados nas 4 simulações apresentadas na Figura 5.3.

Ajuste	ν	E (kPa)	G (kPa)	K (kPa)	H_3 (kPa.dia)	Erro (%)	r^2
1	0,15	1.100	479	524	420.000	13,93	0,89
2	0,20	1.000	417	556	460.000	13,90	0,89
3	0,30	800	308	667	480.000	14,12	0,89
4	0,40	550	196	917	410.000	14,04	0,89

Observa-se na Figura 5.3 que as curvas simuladas obtidas para diferentes valores de ν praticamente coincidem até 300 dias após a construção do aterro de sobrecarga e são semelhantes para tempos mais longos. A Tabela 5.1 mostra que os valores determinados para H_3 são bastante próximos.

A simulação de menor erro foi o ajuste 2, com $\nu=0,20$, $E=1000$ e $H_3=460.000$ kPa.dia. Porém, os erros calculados para os outros ajustes se mostraram muito próximos, todos em torno de 14%. O coeficiente de determinação r^2 , foi 0,89 para todos os valores de ν testados.

Fixando-se o coeficiente de Poisson em 0,20 e o módulo de elasticidade em 1000 kPa, variaram-se os valores do coeficiente de viscosidade H_3 (400.000, 500.000, 600.000 e 700.000 kPa.dia). A Tabela 5.2 e a Figura 5.4 apresentam, respectivamente, os parâmetros utilizados e as curvas obtidas.

Figura 5.4: Ajuste do modelo viscoelástico para diferentes valores de H_3 com coeficiente de Poisson de 0,20 e módulo de Elasticidade de 1000 kPa

Tabela 5.2: Parâmetros utilizados nas 4 simulações apresentadas na Figura 5.4.

Ajuste	ν	E (kPa)	G (kPa)	K (kPa)	H_3 (kPa.dia)	Erro (%)	r^2
1	0,20	1.000	417	556	400.000	14,47	0,88
2					500.000	14,17	0,89
3					600.000	16,41	0,85
4					700.000	19,75	0,78

Não se procurou buscar o menor erro em cada situação, apenas apresentar a sensibilidade do modelo ao coeficiente de viscosidade H_3 para os mesmos parâmetros elásticos. Observa-se na Figura 5.4 que quanto maior o índice de viscosidade H_3 , maior é o tempo necessário para atingir a deformação limite. O menor erro obtido foi de 14,17% para H_3 igual a 500.000 kPa.dia. Da mesma forma, o maior valor de r^2 foi obtido no mesmo ajuste com valor de 0,89.

Fixando-se o coeficiente de Poisson e coeficiente de viscosidade em 0,20 e 460.000 kPa.dia, respectivamente, variou-se o módulo de elasticidade (800, 1000, 1200 e 1500 kPa). Os resultados estão mostrados na Figura 5.5 e na Tabela 5.3.

Figura 5.5: Ajuste do modelo viscoelástico para diferentes valores de módulo de elasticidade com coeficiente de Poisson e coeficiente de viscosidade fixados em 0,20 e 460.000 kPa.dia, respectivamente.

Tabela 5.3: Parâmetros utilizados nas 4 simulações apresentadas na Figura 5.5.

Ajuste	ν	E (kPa)	G (kPa)	K (kPa)	H ₃ (kPa.dia)	Erro (%)	r ²
1	0,20	800	333	444	460.000	22,81	0,71
2		1.000	417	556		13,90	0,89
3		1.200	500	667		18,69	0,81
4		1.500	625	833		30,31	0,49

Nota-se na Figura 5.5 que a variação dos parâmetros elásticos E , G e K influem na deformação final do modelo. Como já era esperado, quanto maior o módulo de elasticidade E , conseqüentemente, a rigidez, menor será a deformação limite final.

Finalmente, fixaram-se os valores de 1000 kPa para o módulo de elasticidade e 460.000 kPa.dia para o H_3 , variando-se o valor do coeficiente de Poisson (0,15, 0,20, 0,30 e 0,40). A Figura 5.6 e a Tabela 5.4 apresentam os resultados.

Figura 5.6: Ajuste do modelo viscoelástico para diferentes valores de coeficiente de Poisson com módulo de elasticidade e coeficiente de viscosidade fixados em 1.000 kPa e 460.000 kPa.dia, respectivamente

Tabela 5.4: Parâmetros utilizados nas 4 simulações apresentadas na Figura 5.6.

Ajuste	ν	E (kPa)	G (kPa)	K (kPa)	H_3 (kPa.dia)	Erro (%)	r^2
1	0,15	1.000	435	476	460.000	14,60	0,88
2	0,20		417	556		13,90	0,89
3	0,30		385	833		19,13	0,80
4	0,40		357	1.667		43,19	0,00

Assim como caso anterior, nota-se que a variação do coeficiente de Poisson quando fixos o módulo de elasticidade e o coeficiente de viscosidade, altera apenas a deformação final do modelo. Como apresentado na Tabela 5.4, quanto maior o coeficiente de Poisson, maior será o módulo de deformabilidade K , resultando em uma deformação final menor.

5.3 COMPRESSÃO CONFINADA EM CAMPO – CAMPI (2011)

Os ajustes do modelo viscoelástico aos recalques obtidos pelo ensaio de placa foram realizados fixando-se o coeficiente de Poisson e determinando-se os valores de E e do coeficiente de viscosidade H_3 que representam melhor a evolução dos recalques em função do tempo obtidos em campo.

A Figura 5.7 e a Tabela 5.5 apresentam os resultados obtidos.

Figura 5.7: Ajuste do modelo viscoelástico aos recalques de campo de Campi (2011) para diferentes valores de coeficiente de Poisson.

Tabela 5.5: Parâmetros utilizados nas 4 simulações apresentadas na Figura 5.7.

Ajuste	ν	E (kPa)	G (kPa)	K (kPa)	H_3 (kPa.dia)	Erro (%)	r^2
1	0,15	3.000	1.304	1.429	1.080	5,55	0,99
2	0,20	2.800	1.167	1.556	1.111	5,66	0,99
3	0,30	2.300	885	1.917	1.111	5,72	0,99
4	0,40	1.500	536	2.500	1.063	5,54	0,99

Observa-se na Figura 5.7 que as curvas obtidas nas quatro simulações são coincidentes. Na Tabela 5.5, nota-se que os valores determinados para H_3 , entre 1.063 e 1.111 kPa.dia, são bastante próximos, o que se comprova pelo fato de que as quatro curvas atingem a deformação final no mesmo período de 700 minutos.

O menor erro foi obtido para o ajuste 4, com $\nu=0,40$, $E=1.500$ e $H_3=1.063$ kPa.dia. Porém, os erros calculados para os outros ajustes se mostraram muito próximos, todos em torno de 5,6%. Quanto ao coeficiente de determinação r^2 todos os ajustes apresentaram valor igual a 0,99.

Visualmente as curvas representaram bem o comportamento do resíduo para o ensaio realizado.

Observa-se que para este caso, os valores do coeficiente de viscosidade H_3 são muito menores do que aqueles encontrados para os dados de campo de Van Elk et al. (2014). Por outro lado, o ensaio de placa teve menor duração. Os valores de H_3 no ajuste do modelo às deformações do ensaio de placa são da ordem de 400 a 500 vezes menores que aqueles determinados no ajuste das deformações de Van Elk et al. (2014).

Os valores de E obtidos neste caso, de 1.500 a 3.000 kPa, resultaram muito próximos daqueles determinados pelo próprio autor nos ensaios de placa, entre 1.000 e 2.500 kPa (item 3.5.2).

5.4 COMPRESSÃO CONFINADA EM LABORATÓRIO – CARVALHO (1999)

Os ajustes do modelo viscoelástico às deformações de uma das amostras submetidas à compressão confinada por Carvalho (1999), foram realizados para os carregamentos de 40, 80 e 160 kPa. Fixou-se o coeficiente de Poisson ν em 0,33, valor determinado pela própria autora com ensaios *crosshole*, e variaram-se os outros parâmetros de modo a obter o menor erro.

As figuras 5.8 a 5.10 apresentam os resultados do ajuste do modelo para cada um dos três carregamentos. A Tabela 5.6 apresenta o resumo dos parâmetros utilizados e dos erros obtidos nos ajustes do modelo para cada estágio de carregamento.

Figura 5.8: Ajuste do modelo viscoelástico para a amostra T2A8COM de Carvalho (1999) no carregamento correspondente a 40 kPa.

Figura 5.9: Ajuste do modelo viscoelástico para a amostra T2A8COM de Carvalho (1999) no carregamento correspondente a 80 kPa.

Figura 5.10: Ajuste do modelo viscoelástico para a amostra T2A8COM de Carvalho (1999) no carregamento correspondente a 160 kPa.

Tabela 5.6: Parâmetros utilizados nas simulações dos três estágios de carregamento para a amostra T2A8COM de Carvalho (1999)

Ajuste	ν	E (kPa)	G (kPa)	K (kPa)	H_3 (kPa.dia)	Erro (%)	r^2
1 – 40 kPa	0,33	570	215	559	132	19,53	0,90
2 – 80 kPa		630	237	618	10	20,30	0,70
3 – 160 kPa		1250	470	1225	28	26,81	0,50

Nota-se que, para obter o menor erro, as curvas simuladas pelo modelo apresentam um rápido aumento das deformações nos instantes iniciais, atingindo a deformação limite do modelo em poucos minutos, o que resulta em valores muito baixos de H_3 , entre 10 e 132 kPa.dia, quando comparados com os obtidos nos ajustes aos dados de Van Elk et al. (2014) e Campi (2011). Isso ocorre, em parte, devido à presença de maior número de leituras nos primeiros minutos de ensaio, onde ocorre maior parte da deformação. O cálculo do erro fica mais ponderado pelos pontos iniciais. O modelo se mostra pouco representativo do comportamento do RSU e os erros variam entre 19,5 e 26,8%, e os coeficientes de determinação entre 0,50 e 0,90.

Na Tabela 5.6 observa-se que os valores de G e E aumentam com o carregamento, comprovando o aumento de rigidez dos RSU com a compressão.

Para este caso de compressão confinada em laboratório o modelo não se apresentou adequado, apresentando erros maiores do que os ajustes feitos com os dados de campo. Os valores de coeficiente de viscosidade para os ajustes foram muito menores do que aqueles obtidos para os dados de campo, indicando comportamento viscoso pouco expressivo do material nas condições do ensaio.

5.5 COMPRESSÃO CONFINADA EM LABORATÓRIO – HOSSAIN et al. (2009)

O modelo viscoelástico foi ajustado ao ensaio edométrico de Hossain et al. (2009). Fixou-se o coeficiente de Poisson em 0,30 e variaram-se os outros parâmetros de modo que se obtivesse o menor erro possível.

Os resultados, parâmetros utilizados e erros calculados estão apresentados na Figura 5.12 e na Tabela 5.8.

Figura 5.11: Ajuste do modelo viscoelástico para a amostra $r=0,13$ de Hossain et al. (2009) às deformações do ensaio edométrico até 3 dias de carregamento.

Tabela 5.7: Parâmetros utilizados nos duas simulações para o carregamento de 94 kPa na amostra $r=0,13$ de Hossain (2009) com $\nu=0,3$.

Ajuste	ν	E (kPa)	G (kPa)	K (kPa)	H ₃ (kPa.dia)	Erro (%)	r ²
1 – 3 dias	0,30	1.300	500	1.083	139	16,54	0,94

O ajuste demonstrou pouca eficácia, apresentando erro de 16,54% e com r² de 0,94.

A curva correspondente tem aparência semelhante às obtidas para os ensaios de Carvalho (1999). Além disso, o coeficiente de viscosidade se encontra na mesma faixa de grandeza nos dois casos.

6. RESULTADOS DO MODELO TRIDIMENSIONAL VISCOELÁSTICO COMPOSTO DE DOIS ELEMENTOS DE KELVIN-VOIGT LIGADOS EM SÉRIE APLICADO PARA COMPRESSÃO CONFINADA (2º MODELO)

Neste item são apresentados os resultados de previsão de deformação em função do tempo obtidos com o segundo modelo viscoelástico confrontados com os resultados dos ensaios de campo e laboratório.

Como não há referência na literatura aos parâmetros M_1 , M_2 , H_4 e H_5 , estes foram estimados por minimização do erro e do coeficiente de determinação.

Nas figuras que apresentam os resultados de cada caso estudado são apresentados:

- Os pontos experimentais do ensaio;
- A curva de ajuste do modelo segundo a equação 4.18 (linha cheia nos gráficos);
- O primeiro termo da equação 4.18, referente ao primeiro conjunto Kelvin-Voigt do modelo apresentado no item 4.2 (linha pontilhada nos gráficos);
- O segundo termo da equação 4.18, referente ao segundo conjunto Kelvin-Voigt do modelo apresentado no item 4.2 (linha tracejada nos gráficos).

Ressalta-se que a soma das deformações obtidas por cada um dos dois termos resulta na deformação total do modelo (curva de ajuste do modelo).

As curvas dos dois termos da equação 4.18 foram incorporadas na apresentação dos resultados para que fosse possível observar os dois conjuntos Kevin-Voigt trabalhando juntos no decorrer do tempo e a contribuição parcial de cada um na deformação total do modelo a cada instante. Assim pode-se identificar a influência dos pares de parâmetros M_1 e H_4 do primeiro termo e M_2 e H_5 do segundo termo, em qualquer tempo que se queira analisar.

Para o caso dos ajustes em que $M_1=M_2$, verifica-se pela equação 4.18 que quando o tempo t tende ao infinito, as deformações dos dois termos são iguais,

representando cada uma 50% da deformação total do modelo. Assim, é esperado que em um determinado tempo t as deformações dos dois termos se igualem e as curvas dos dois termos coincidam, sendo que os valores de H_4 e H_5 determinam em que momento isso deverá ocorrer.

6.1 COMPRESSÃO CONFINADA EM CAMPO – VAN ELK et al. (2014)

As figuras 6.1 e 6.2 apresentam os resultados obtidos através do ajuste do segundo modelo viscoelástico aos pontos experimentais de Van Elk et al. (2014). O primeiro ajuste foi feito com $M_1=M_2$ e o segundo com $M_1 \neq M_2$.

A Tabela 6.1 apresenta o resumo dos parâmetros obtidos, bem como os valores do erro e do coeficiente de determinação r^2 .

Figura 6.1: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de campo de Van Elk et al. (2014) com $M_1 \neq M_2$.

Figura 6.2: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de campo de Van Elk et al. (2014) com $M_1=M_2$.

Tabela 6.1: Parâmetros utilizados nos dois ajustes das figuras 6.1 e 6.2.

Ajuste	M_1 (kPa)	M_2 (kPa)	H_4 (kPa.dia)	H_5 (kPa.dia)	Erro (%)	r^2
1	1.900	1.800	3.000.000	330.000	11,62	0,93
2	1.850		2.500.000	470.000	12,25	0,92

Para este caso, os dois ajustes são muito parecidos, com valores de H_4 e H_5 muito próximos. O ajuste 1 se apresentou levemente melhor que o ajuste 2, com erro de 11,62% contra 12,35% do segundo, fato também verificado no coeficiente de determinação r^2 , 0,93 do primeiro contra 0,92 do segundo.

Nota-se que os valores de M_1 e M_2 para os dois ajustes são bem próximos e que o valor de H_4 é uma ordem de grandeza maior que o valor de H_5 , fazendo com que as curvas referentes ao primeiro e segundo termo da equação do modelo se diferenciem pela viscosidade imposta para cada termo.

É possível observar que até cerca de 100 a 200 dias, o primeiro termo, com viscosidade menor, apresenta menos influência no modelo do que o segundo termo, com maior valor de viscosidade. Nos tempos acima de 200 dias, as deformações do segundo termo se estabilizam e o primeiro termo passa a ter mais influência no modelo. No final do ensaio, as deformações dos dois termos são mais próximas, mas ainda o primeiro termo resulta em deformação menor pois o valor de M_1 é maior.

6.2 COMPRESSÃO CONFINADA EM CAMPO – CAMPI (2011)

As figuras 6.3 e 6.4 apresentam os resultados obtidos através do segundo modelo viscoelástico ajustado aos pontos experimentais de Campi (2011). O primeiro ajuste foi feito com $M_1 \neq M_2$ e o segundo com $M_1 = M_2$.

A Tabela 6.2 apresenta o resumo dos parâmetros obtidos, bem como os valores do erro e do coeficiente de determinação r^2 .

Figura 6.3: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de campo de Campi (2011) com $M_1 \neq M_2$.

Figura 6.4: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de campo de Campi (2011) com $M_1 = M_2$.

Tabela 6.2: Parâmetros utilizados nos dois ajustes das Figuras 6.3 e 6.4.

Ajuste	M_1 (kPa)	M_2 (kPa)	H_4 (kPa.dia)	H_5 (kPa.dia)	Erro (%)	r^2
1	5.000	6.650	3.472	1.389	10,58	0,99
2	6.100		3.472	1.389	10,82	0,99

Para este caso os dois ajustes são praticamente iguais, com valores de H_4 e H_5 coincidentes. O ajuste 1, com $M_1 \neq M_2$, se apresentou levemente melhor que o ajuste 2, com $M_1 = M_2$, apresentando erro de 10,58% contra 10,82% do segundo. O mesmo valor do coeficiente de determinação r^2 , 0,99, foi encontrado nos dois ajustes.

Os coeficientes H_4 e H_5 têm a mesma ordem de grandeza, com H_4 2,5 vezes maior do que H_5 . Os valores de M_1 e M_2 foram, respectivamente, 5.000 e 6.650 kPa, respectivamente 2,6 e 3,7 vezes maiores do que os valores correspondentes obtidos nos ensaios de Van Elk et al. (2014).

6.3 COMPRESSÃO CONFINADA EM LABORATÓRIO – CARVALHO (1999)

As figuras 6.5 a 6.10 apresentam os resultados obtidos através do ajuste do segundo modelo viscoelástico aos pontos experimentais de Carvalho (1999). O primeiro ajuste de cada estágio de carregamento foi feito com $M_1 \neq M_2$ e o segundo com $M_1 = M_2$.

A Tabela 6.3 apresenta o resumo dos parâmetros obtidos, bem como os valores do erro e do coeficiente de determinação r^2 .

Figura 6.5: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Carvalho (1999) para o estágio de carregamento de 40 kPa com $M_1 \neq M_2$.

Figura 6.6: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Carvalho (1999) para o estágio de carregamento de 40 kPa com $M_1 = M_2$.

Figura 6.7: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Carvalho (1999) para o estágio de carregamento de 80 kPa com $M_1 \neq M_2$.

Figura 6.8: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Carvalho (1999) para o estágio de carregamento de 80 kPa com $M_1 = M_2$.

Figura 6.9: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Carvalho (1999) para o estágio de carregamento de 160 kPa com $M_1 \neq M_2$.

Figura 6.10: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Carvalho (1999) para o estágio de carregamento de 160 kPa com $M_1 = M_2$.

Tabela 6.3: Parâmetros utilizados nos dois ajustes das Figuras 6.5 a 6.10.

Ajuste	M_1 (kPa)	M_2 (kPa)	H_4 (kPa.dia)	H_5 (kPa.dia)	Erro (%)	r^2
1 – 40kPa	1.800	1.400	5.208	83	3,32	1,00
2 – 40 kPa	1.520		4.306	90	4,37	0,99
3 – 80kPa	3.300	1.200	4.028	2,1	8,42	0,95
4 – 80 kPa	1.800		556	0,6	11,85	0,90
5 – 160 kPa	6.050	2.500	11.111	6,9	15,98	0,84
6 – 160 kPa	3.600		1.250	3,9	14,39	0,87

Observa-se que a previsão de recalques pelo segundo modelo é muito superior à obtida com o primeiro modelo nos ensaios de compressão confinada de Carvalho (1999).

Para os três estágios de carregamento, notou-se que quanto maior o carregamento menos representativo ficou o ajuste do modelo.

Os dois ajustes para o estágio de carregamento de 40 kPa apresentaram erros de 3,32% e 4,37% para $M_1 \neq M_2$ e $M_1 = M_2$, respectivamente. Com relação ao coeficiente r^2 , os valores obtidos foram de 1,00 e 0,99 para $M_1 \neq M_2$ e $M_1 = M_2$, respectivamente. Já para o carregamento de 80 kPa, os erros foram de 8,42% e 11,85% para $M_1 \neq M_2$ e $M_1 = M_2$, respectivamente. Com relação ao coeficiente r^2 , os valores obtidos foram de 0,95 e 0,90 para $M_1 \neq M_2$ e $M_1 = M_2$, respectivamente. Por fim, nos ajustes para carregamento de 160 kPa os erros foram de 15,98% e 14,39% para $M_1 \neq M_2$ e $M_1 = M_2$, respectivamente. Com relação ao coeficiente r^2 , os valores obtidos foram de 0,84 e 0,87 para $M_1 \neq M_2$ e $M_1 = M_2$, respectivamente.

Como esperado, os valores de M_1 e M_2 aumentaram conforme o aumento de carga em cada estágio. Os valores de M_1 e M_2 foram de 1.400 a 1.800 kPa para o carregamento de 40 kPa, 1.200 a 3.300 kPa para o carregamento de 80 kPa e 2.500 a 6.050 kPa para o carregamento de 160 kPa.

Para os 6 ajustes, os valores de H_4 foram de 2 a 3 ordens de grandeza maiores que os de H_5 . Isso ocorreu porque um conjunto (segundo termo) deve apresentar baixa viscosidade para o modelo poder representar o desenvolvimento de elevadas deformações nos instantes iniciais, enquanto o outro conjunto (primeiro termo) de alta viscosidade possibilita o ajuste da curva nos tempos maiores. O conjunto de baixa viscosidade atinge rapidamente a deformação máxima, dada pelo parâmetro M_1 . O conjunto de alta viscosidade começa a colaborar significativamente depois que foi atingida a deformação máxima do conjunto de baixa viscosidade.

Os valores de H_4 variaram de 556 a 11.111 kPa.dia, enquanto os valores de H_5 variaram entre 0,6 e 90 kPa.dia.

6.4 COMPRESSÃO CONFINADA EM LABORATÓRIO – HOSSAIN et al. (2009)

As figuras 6.11 e 6.12 apresentam os resultados obtidos através do ajuste do segundo modelo viscoelástico aos pontos experimentais de Hossain et al. (2009). O primeiro ajuste foi feito com $M_1 \neq M_2$ e o segundo com $M_1 = M_2$.

A Tabela 6.3 apresenta o resumo dos parâmetros obtidos, bem como os valores do erro e do coeficiente de determinação r^2 .

Figura 6.11: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Hossain et al. (2009) para o estágio de carregamento de 95 kPa com $M_1 \neq M_2$.

Figura 6.12: Ajuste do segundo modelo viscoelástico aos recalques de laboratório de Hossain et al. (2009) para o estágio de carregamento de 95 kPa com $M_1=M_2$.

Tabela 6.4: Parâmetros utilizados nos dois ajustes das Figuras 6.11 e 6.12.

Ajuste	M_1 (kPa)	M_2 (kPa)	H_4 (kPa.dia)	H_5 (kPa.dia)	Erro (%)	r^2
1	2.450	4.000	9.028	104	3,91	0,99
2	3.200		11.458	111	7,55	0,99

Os valores de H_4 e H_5 se apresentaram na mesma ordem de grandeza nos dois casos, assim como M_1 e M_2 . O primeiro ajuste para $M_1 \neq M_2$ apresentou erro de 3,91% e r^2 de 0,99, enquanto o segundo ajuste para $M_1=M_2$, apresentou erro de 7,55 e 0,99 para o coeficiente r^2 .

Os ajustes se apresentaram bem representativos e os valores de M_1 e M_2 variaram de 2.450 a 4.000 kPa.

Assim como nos ajustes do segundo modelo viscoelástico aos ensaios de Carvalho (1999), o segundo termo do modelo apresenta maior influência nos pontos iniciais, para a deformação quase que imediata do corpo de prova, com valores de H_5 de 2 ordens de grandeza menores do que H_4 .

Cabe observar que Hossain et al. (2009) e Carvalho (1999) não interpretaram da mesma maneira os resultados de seus ensaios de compressão confinada em laboratório. Sabe-se que nos ensaios de adensamento de laboratório há uma compressão imediata que pode ser não elástica, relacionada ao acomodamento do equipamento. Hossain et al. (2009) consideraram um recalque imediato de 32% e consideraram como recalques por adensamento em cada estágio aqueles medidos após o recalque imediato, enquanto Carvalho (1999) incluiu o recalque imediato no valor das deformações medidas.

6.5 RESUMO DOS VALORES OBTIDOS

A previsão da deformação ao longo do tempo por meio do segundo modelo viscoelástico foi melhor do que com o primeiro modelo viscoelástico, principalmente no caso dos ensaios de compressão confinada de laboratório.

Neste item é apresentado um resumo dos valores obtidos pela aplicação do segundo modelo viscoelástico aos dados de ensaios de laboratório e campo utilizados nesta pesquisa.

A Tabela 6.5 apresenta os valores de M_1 , M_2 , H_4 e H_5 , o tipo de ensaio, a duração do ensaio, a carga de fluência e a qualidade de ajuste por meio do erro e do coeficiente de determinação r^2 .

Tabela 6.5: Resumo dos parâmetros obtidos nos ajustes do segundo modelo viscoelástico.

RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS NOS AJUSTES DO SEGUNDO MODELO VISCOELÁSTICO									
ENSAIO	AUTOR	Duração do Ensaio (min)	CARGA (KpA)	M_1 (MPa)	M_2 (MPa)	H_4 (kPa.dia)	H_5 (kPa.dia)	Erro (%)	r^2
Aterro de Sobrecarga em Aterro Sanitário	ELK et al. (2014)	839.520	64,0	1,90	1,80	3,0E+06	3,3E+05	11,62	0,93
				1,85		2,5E+06	4,7E+05	12,25	0,92
Ensaio de Placa em Aterro Sanitário	CAMPI (2011)	497	119,4	5,00	6,65	3,5E+03	1,4E+03	10,58	0,99
				6,10		3,5E+03	1,4E+03	10,82	0,99
Compressão confinada em laboratório	CARVALHO (1999)	5.870	40,0	1,80	1,40	5,2E+03	8,3E+01	3,32	1,00
				1,52		4,3E+03	9,0E+01	4,37	0,99
		4.250	80,0	3,30	1,20	4,0E+03	2,1E+00	8,42	0,95
				1,80		5,6E+02	6,0E-01	11,85	0,90
		5.682	160,0	6,05	2,50	1,1E+04	6,9E+00	15,98	0,84
				3,60		1,3E+03	3,9E+00	14,39	0,87
Compressão confinada em laboratório	HOSSAIN et al. (2009)	4.200	95,0	2,45	4,00	9,0E+03	1,0E+02	3,91	0,99
				3,20		1,1E+04	1,1E+02	7,55	0,99

Os valores de M_1 e M_2 variaram entre 1,2 e 6,7 MPa considerando os quatro casos estudados. Considerando-se um único parâmetro elástico ($M_1=M_2$), o valor variou entre 1,5 e 6,3 MPa.

Nos ensaios de laboratório, como o esperado, os valores dos parâmetros elásticos de rigidez M_1 e M_2 são maiores à medida que aumenta a tensão de fluência aplicada, pois a cada estágio de compressão a amostra se torna mais densa e, portanto, menos deformável.

A faixa de valores dos parâmetros de viscosidade H_4 e H_5 foi muito vasta. No caso do parâmetro H_4 , o valor variou de $5,6 \cdot 10^2$ a $3,0 \cdot 10^6$ kPa.dia, enquanto o parâmetro H_5 variou de $6,0 \cdot 10^{-1}$ a $4,8 \cdot 10^5$ kPa.dia. Porém, considerando-se apenas os ensaios realizados em laboratório, as faixas de variação foram de $5,6 \cdot 10^2$ a $1,1 \cdot 10^4$ kPa.dia e de $6,0 \cdot 10^{-1}$ a $1,1 \cdot 10^2$ kPa.dia para H_4 e H_5 , respectivamente.

Os ensaios de campo de Van Elk et al. (2014) apresentaram os parâmetros de viscosidade muito mais elevados do que os demais, provavelmente porque ainda sofreram biodegradação no campo durante os 600 dias de monitoramento, embora visualmente se encontrassem muito degradados.

Os ensaios de Elk et al. (2014) apresentam M da ordem de 0,8 a 1,6 MPa, enquanto no segundo modelo foi obtido uma variação de 1,8 a 1,9 MPa para M_1 e M_2 . Da mesma forma, percebe-se mesma semelhança de ordem de grandeza para os ensaios de Campi (2011), onde se obteve valores de M entre 2,1 a 4,2 MPa e 5,0 a 6,6 MPa para M_1 e M_2 .

Para os ensaios de laboratório de Carvalho (1999) os valores de M ficaram entre 0,9 e 1,9 MPa, enquanto que os valores de M_1 e M_2 variaram entre 1,4 e 6,0 MPa. Para os ensaios de Hossain et al. (2009) obteve-se um valor de 1,8 MPa para o parâmetro M e 2,5 a 3,2 MPa para os parâmetros M_1 e M_2 , respectivamente.

Comparando-se os dois parâmetros de viscosidade do segundo modelo viscoelástico, o parâmetro H_4 é 2,5 a 142 vezes o parâmetro H_5 .

A título de comparação, na Tabela 6.6 estão apresentados os resultados obtidos pelo ajuste do primeiro modelo viscoelástico.

Tabela 6.6: Resumo dos parâmetros obtidos nos ajustes do primeiro modelo viscoelástico.

RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS NOS AJUSTES DO PRIMEIRO MODELO VISCOELÁSTICO						
ENSAIO	AUTOR	G (MPa)	E (MPa)	K (MPa)	M (Mpa)	Média H3 (kPa.dia)
Aterro de Sobrecarga em Aterro Sanitário	ELK et al. (2014)	0,2-0,5	0,6-1,1	0,5-0,9	0,8-1,6	4,43E+05
Ensaio de Placa em Aterro Sanitário	CAMPI (2011)	0,5-1,3	1,5-3,0	1,4-2,5	2,1-4,2	1,09E+03
Compressão confinada em laboratório	CARVALHO (1999)	0,2-0,5	0,6-1,3	0,6-1,2	0,9-1,9	5,70E+01
Compressão confinada em laboratório	HOSSAIN et al. (2009)	0,5	1,0	1,1	1,8	1,39E+02

Nota-se que os valores do parâmetro elástico M , calculado pela teoria da elasticidade a partir dos valores de G e K obtidos nos ajustes, variaram entre 0,8 e 4,2 MPa. Esses valores encontram-se dentro da faixa de valores de M_1 e M_2 obtidos pelo segundo modelo viscoelástico.

Os módulos volumétrico K , cisalhante G e de Young E obtidos por ajuste segundo o menor erro apresentaram valores que variaram, respectivamente de, 0,5 a 2,5 MPa, 0,2 a 1,3 MPa e 0,6 a 3,0 MPa.

Já quanto ao parâmetro viscoso H_3 , foi obtida uma grande variação de valores, que se encontraram dentro do intervalo de $5,7 \cdot 10^1$ a $4,4 \cdot 10^5$ kPa.dia.

É interessante notar que o parâmetro H_3 é muito semelhante ao parâmetro H_5 (H_3 variou de 0,8 a 1,8 de H_5). O outro parâmetro viscoso, H_4 , contudo, é que propiciou a melhor qualidade de previsão de comportamento do segundo modelo viscoelástico em relação ao primeiro.

A Tabela 6.7 apresenta essas faixas de valores dos parâmetros elásticos e a média dos parâmetros viscosos obtidos nos ajustes dos dois modelos viscoelásticos.

Tabela 6.7: Resumo dos parâmetros elásticos (M , M_1 e M_2) e viscosos (H_3 , H_4 e H_5) obtidos nos ajustes dos dois modelos viscoelásticos.

RESUMO DOS PARÂMETROS ELÁSTICOS E VISCOSOS OBTIDOS NOS AJUSTES DOS DOIS MODELOS VISCOELÁSTICOS							
		<u>1º Modelo</u>	<u>2º Modelo</u>		<u>1º Modelo</u>	<u>2º Modelo</u>	
ENSAIO	AUTOR	M (Mpa)	M ₁ (MPa)	M ₂ (MPa)	Média H ₃ (kPa.dia)	Média H ₄ (kPa.dia)	Média H ₅ (kPa.dia)
Aterro de Sobrecarga em Aterro Sanitário	ELK et al. (2014)	0,80-1,60	1,85-1,90	1,80-1,85	4,43E+05	2,75E+06	4,00E+05
Ensaio de Placa em Aterro Sanitário	CAMPI (2011)	2,10-4,20	5,00-6,10	6,10-6,65	1,09E+03	3,47E+03	1,39E+03
Compressão confinada em laboratório	CARVALHO (1999)	0,90-1,90	1,52-6,05	1,40-3,60	5,70E+01	4,41E+03	3,11E+01
Compressão confinada em laboratório	HOSSAIN et al. (2009)	1,8	2,45-3,20	3,20-4,00	1,39E+02	1,02E+04	1,08E+02

7. CONCLUSÕES

Depois de realizada a aplicação de dois modelos tridimensionais viscoelásticos para solicitação de compressão confinada em quatro casos de ensaios de campo e laboratório retirados da bibliografia, conclui-se que o comportamento à compressão ao longo do tempo de resíduos sólidos urbanos pode ser representado satisfatoriamente pela viscoelasticidade.

O primeiro modelo utilizado, o modelo tridimensional de Kevin-Voigt, apresentou baixa eficiência na previsão das deformações ao longo do tempo nos ensaios de laboratório. Por outro lado, o segundo modelo, composto pela ligação em série de dois conjuntos de Kelvin-Voigt, apresentou desenvolvimento das deformações muito próximo aos valores medidos, com boa qualidade de ajuste estimada pelo erro e pelo coeficiente de determinação.

Os dois modelos diferem quanto aos parâmetros que os compõem. No primeiro modelo os parâmetros elásticos K , G , E e ν podem ser agregados no parâmetro M pelas equações da teoria da elasticidade. Os valores dos parâmetros elásticos de RSU obtidos na literatura por interpretação de ensaios com hipótese de elasticidade linear não podem, contudo, ser utilizados para estimativa dos parâmetros elásticos da viscoelasticidade. O parâmetro M foi, portanto, obtido por ajuste do primeiro modelo viscoelástico a dados experimentais minimizando-se o erro e o coeficiente de determinação.

Os valores dos parâmetros elásticos M_1 e M_2 do segundo modelo, também obtidos por ajustes a dados experimentais minimizando-se o erro e o coeficiente de determinação, foram coerentes com os valores estimados do parâmetro M do primeiro modelo.

Os parâmetros viscosos H_3 (do primeiro modelo) e H_4 e H_5 (do segundo modelo) resultaram do desenvolvimento e simplificação dos dois modelos viscoelásticos, não sendo encontrados valores na bibliografia para referência ou comparação. A estimativa do valor dos parâmetros de viscosidade é o desafio que se coloca para a aplicação dos modelos viscoelásticos para RSU.

Realmente, a parcela de deformação causada pela biodegradação dos RSU não foi considerada nos modelos investigados nesta pesquisa, partindo-se da hipótese de que os ensaios apresentaram uma parcela insignificante de recalques causados pela biodegradação. Considerou-se apenas a deformação mecânica causada pela carga de fluência e pelo peso próprio dos resíduos, pois os ensaios foram de curta duração, de no máximo 4 dias, com resíduos aparentemente em estágio avançado de decomposição.

A larga faixa encontrada para os valores estimados dos parâmetros viscosos pode ser atribuída à diferente composição dos resíduos analisados, e também ao fato de que a contribuição da biodegradação possivelmente era ainda significativa no caso do ensaio de campo de Van Elk et al. (2014), que durou 600 dias, de modo que os parâmetros viscosos incorporaram a parcela dos recalques devidos à perda de massa sólida.

A estimativa dos parâmetros elásticos e viscosos dos RSU pode ser melhorada com a análise de mais casos reportados na bibliografia e pela realização de ensaios apropriados para esta finalidade.

Uma abordagem mais detalhada sobre a magnitude dos valores de parâmetros obtidos nas duas modelagens é discutida nos itens 7.1 e 7.2. Os valores dos parâmetros obtidos nos dois modelos são comparados e analisados conforme cada tipo de ensaio, carga de fluência aplicada e tempo de ensaio.

7.1 CONCLUSÕES SOBRE OS AJUSTES FEITOS COM O MODELO TRIDIMENSIONAL VISCOELÁSTICO DE KELVIN-VOIGT APLICADO PARA COMPRESSÃO CONFINADA (1º MODELO)

Com os ajustes do primeiro modelo tridimensional viscoelástico de Kelvin-Voigt aplicado para compressão confinada, foi possível visualizar os conceitos da viscoelasticidade apresentados na revisão bibliográfica. Os parâmetros elásticos E e ν determinam a deformação máxima, enquanto o parâmetro viscoso H_3 determina em quanto tempo a deformação final deve ocorrer.

O módulo edométrico M foi estimado entre 0,8 e 4,2 MPa. Variando-se o coeficiente de Poisson ν entre 0,15 e 0,4, obtiveram-se valores do módulo de elasticidade E entre 0,6 e 3,0 MPa, do módulo de cisalhamento G entre 0,2 e 1,3 MPa e do módulo volumétrico K entre 0,5 e 2,5 MPa.

Não foi possível definir uma ordem de grandeza para o coeficiente de viscosidade H_3 . Os valores obtidos nos ajustes variaram em ordens de grandeza. Para os dados de campo de Van Elk et al. (2014) por exemplo, os valores de H_3 resultaram da ordem de 10^5 kPa.dia para um monitoramento de aproximadamente 600 dias. Para os ajustes aos recalques do ensaio de placa de Campi (2011) com duração de 8 horas, determinaram-se valores de H_3 da ordem de 10^3 kPa.dia. Já os ajustes aos resultados de laboratório em compressão confinada de Carvalho (1999) resultaram em valores da ordem de 10 a 10^2 kPa.dia para H_3 , para 4 dias de duração de ensaio. Nos ajustes ao ensaio edométrico de Hossain et al. (2009), os valores de H_3 se aproximaram dos valores obtidos nos ajustes ao ensaio de Carvalho (1999), na ordem de 10^2 kPa.dia, embora os valores dos parâmetros elásticos usados tenham sido diferentes.

Este primeiro modelo viscoelástico utilizado na pesquisa não representou bem as curvas de deformação vertical ao longo do tempo dos ensaios de laboratório, resultando em alguns erros maiores do que 20% e coeficientes de determinação r^2 de até 0,50. Como o maior número de leituras é feito no início do ensaio, o cálculo do erro acaba dando mais peso a essas leituras. Nos ensaios de compressão confinada isso fica bem evidente, quando os intervalos de leituras vão sendo duplicados.

7.2 CONCLUSÕES SOBRE OS AJUSTES FEITOS COM O MODELO TRIDIMENSIONAL VISCOELÁSTICO COMPOSTO DE DOIS ELEMENTOS DE KELVIN-VOIGT LIGADOS EM SÉRIE APLICADO PARA COMPRESSÃO CONFINADA (2º MODELO)

O segundo modelo se mostrou bastante eficaz na representação de ensaios realizados com RSU quando submetidos à compressão sem deformação lateral.

As curvas teóricas obtidas com este modelo, ajustadas aos dados reais, apresentaram erros menores e maiores coeficientes de determinação r^2 do que aqueles obtidos com o primeiro modelo viscoelástico. O ajuste mais deficiente referiu-se ao ensaio de laboratório de Carvalho (1999) para o estágio de carregamento de 160 kPa. Nesse caso, obtiveram-se valores de erro e de coeficiente de determinação de 16% e 0,84, respectivamente, ainda assim melhores do que os obtidos com o ajuste do primeiro modelo para os mesmos dados (27% e 0,50 para erro e r^2 , respectivamente).

Os parâmetros elásticos contidos no modelo, M_1 e M_2 , foram avaliados entre 1,5 a 6,1 MPa para o M_1 e 1,2 a 6,7 MPa para o M_2 .

Fazendo uma comparação de M_1 e M_2 obtidos no segundo modelo com os parâmetros M do primeiro modelo, percebe-se que estão na mesma ordem de grandeza. Uma primeira estimativa para de M_1 e M_2 pode ser feita por meio do próprio parâmetro M do primeiro modelo.

Quanto aos parâmetros viscosos H_4 e H_5 do segundo modelo viscoelástico, as faixas de valores variaram de $5 \cdot 10^2$ a $3 \cdot 10^6$ kPa.dia para o H_4 e $6 \cdot 10^{-1}$ a $3,3 \cdot 10^5$ kPa.dia para o H_5 .

Fazendo comparação de H_4 e H_5 obtidos no segundo modelo com os parâmetros H_3 do primeiro modelo, obtidos pela teoria da elasticidade e apresentados na Tabela 6.6, percebe-se algumas semelhanças de valores quanto às suas ordens de grandeza. Os ensaios de Elk et al. (2014) apresentam H_3 da ordem de 10^5 kPa.dia, enquanto no segundo modelo foram obtidos valores de 10^6 e 10^5 kPa.dia para H_4 e H_5 , respectivamente. Da mesma forma, percebe-se mesma semelhança de ordem de grandeza para os ensaios de Campi (2011), onde obteve-se valores de H_3 , H_4 e H_5 da ordem de 10^3 kPa.dia.

Para os ensaios de laboratório de Carvalho (1999) os valores de H_3 ficaram na ordem de grandeza de 10^1 kPa.dia, enquanto que os valores de H_4 e H_5 variaram da ordem de 10^2 a 10^4 e 10^{-1} a 10^1 kPa.dia, respectivamente. Para os ensaios de Hossain et al. (2009) obteve-se um valor de 10^2 kPa.dia para o

parâmetro H_3 e, 10^4 e 10^2 kPa.dia para os parâmetros H_4 e H_5 , respectivamente.

É interessante notar que o parâmetro H_3 é muito semelhante ao parâmetro H_5 (H_3 variou de 0,8 a 1,8 de H_5). O outro parâmetro viscoso, H_4 , contudo, é que propiciou a melhor qualidade de previsão de comportamento do segundo modelo viscoelástico em relação ao primeiro.

7.3 SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA

Após a aplicação dos dois modelos tridimensionais viscoelásticos para compressão confinada em ensaio de campo e laboratório, são elencadas algumas sugestões para a continuidade da pesquisa visando a utilização do segundo e mais eficiente modelo:

- Aplicação do segundo modelo viscoelástico em mais ensaios de compressão confinada, a fim de se obter maior gama de valores dos parâmetros para comparação com os obtidos nesta pesquisa;
- Aplicação do segundo modelo viscoelástico em ensaios de laboratório com diferentes amostras, mas com mesmas tensões de fluência, mesma duração de ensaio, e mesmos intervalos de leitura das deformações, para tentar correlacionar os valores obtidos com a composição dos RSU;
- Monitoramento da geração de biogás e lixiviado durante os ensaios, para poder se certificar que não está ocorrendo parcela significativa de deformação por biodegradação, além da deformação por fluência;
- Aplicação do segundo modelo viscoelástico em ensaios com outros tipos de materiais, como uma argila mole, por exemplo, para obtenção de parâmetros viscosos para comparação com os parâmetros obtidos nos RSU;
- Aplicação do segundo modelo viscoelástico em ensaios realizados com amostras de RSU novo, em que as grandes parcelas de recalque por biodegradação não aconteceram e fazer a consideração desses recalques no modelo.

- Simplificação do modelo tridimensional de Kelvin-Voigt para outros tipos de solicitações, de modo a verificar a eficiência da previsão das deformações ao longo do tempo para outros tipos de ensaios.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, R. C. (2000). Compressibilidade de maciços sanitários. Dissertação de mestrado, EPUSP, São Paulo.

ABREU, R.C.; BOSCOV, M.E.G. (2000). Aterros sanitários. Previsão de Desempenho x Comportamento Real. Editado por ABMS/NRSP, pp. 7-44, São Paulo.

AZEVEDO, R. F.; RIBEIRO, A. G. C. e AZEVEDO, I. D. (2006). Determination of municipal solid waste strength parameters using a large dimension lisimeter test. Simpósio Internacional de Tecnologia e Tratamento de Resíduos Sólidos - SITTRS, Anais, Rio de Janeiro.

BENVENUTO, C. & CUNHA, M. (1991). Escorregamento em Massa de Lixo no Aterro Sanitário Bandeirantes em São Paulo. II SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS – REGEO'91, Anais.

BORGATTO, A.V.A.; MAHLER, C.F.; MÜNNICH, K. (2014). Influência do material plástico mole nos parâmetros de resistência dos resíduos sólidos urbanos “pré-tratados”. Geotecnia, v. 127, pp. 47- 56.

BOSCOV, M.E.G. (2006). Desafios geotécnicos no projeto e construção de aterros de resíduos. XIII COBRAMSEG - XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica / IV SBMR – IV Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, Anais, v. de palestras, pp. 145-174, Curitiba, PR.

BOSCOV, M. E. G. (2008). Geotecnia Ambiental. Oficina de textos, São Paulo.

BRAY, J. D.; ZEKOS, D.; KAVAZANJIAN JR., E.; ATHANASOPOULOS, G. A.; RIEMER, M. F. (2009). Shear strength of municipal solid waste. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 135, No. 6, pp. 709-722.

CAMPI, T. M. O.; BOSCOV, M.E.G. (2011). Determination of shear strength parameters of Municipal Solid Waste (MSW) by means of static plate load tests. Geo-Frontiers 2011 - Advances in Geotechnical Engineering, ASCE,

Proceedings, pp. 1227-1236, eds. Han et al., ISBN 978-0-7844-1165-0, Dallas, EUA.

CAMPI, T. M. O. (2011). Análise do comportamento reológico dos resíduos sólidos urbanos por meio de resultados de ensaios de placa in situ. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARVALHO, M. F., VILAR, O.M. (1998). In situ tests in urban waste sanitary landfill. Environmental Geotechnics, editor Seco e Pinto, Balkema, Rotterdam, pp. 121-126.

CARVALHO, M. D. (1999). Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

COGLIATI, B. (2011). Modelos viscosos em Mecânica dos Solos: estudo de uma equação visco-hipoplástica. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

COUMOULOS, D. G.; KORYALOS, T. P. (1997) Prediction of attenuation of landfill settlement rates with time. 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Proceedings, Vol. 3, Hamburg, Germany.

DIN - Deutsches Institut für Normung (2002). DIN-18137-3: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit - Teil 3: Direkter Scherversuch (Investigação em amostras de solo – Determinação da resistência ao cisalhamento - Parte 3: Ensaio de cisalhamento direto).

DIXON, N.; WHITTLE, R. W.; JONES, D. R. V. and NG'AMBI, S. (2006). Pressurameter tests in municipal solid waste: measurement of shear stiffness. Géotechnique, 56, No 3, pp. 211-222.

GIBSON, R. E. & Lo, K. Y. (1961). A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression. Norwegian Geotechnical Institute, Publication No. 41, pp. 1–16, Oslo.

HOSSAIN, M.S.; GABR, M.A.; ASCE, F. (2009). The effect of shredding and test apparatus size on compressibility and strength parameters of degraded municipal solid waste. *International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology*.

HOUSTON W. N.; HOUSTON S. L.; LIU J. W.; ELSAYED A.; SANDERS C. O. (1995). In-situ testing methods for dynamic properties of MSW Landfills. In: *Proceedings of specialty conference on earthquake design and performance of solid waste landfills*, Geotechnical Special Publication 54, ASCE, San Diego, CA, October, 1995, pp. 73–82.

KARIMPOUR-FARD, M.; MACHADO, S. L. (2012). Deformation characteristics of MSW materials. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 17, pp. 2009-2014.

KAVAZANJIAN JR, E.; MATASOVIC, N.; BACHUS, R.C. (1999). Large-diameter static and cyclic laboratory testing of municipal solid waste. Sardinia '99 - 7th International Waste Management and Landfill Symposium, *Proceedings*, Vol. III, pp. 437-444, Cagliari, Italy.

KAVAZANJIAN JR, E. (2001). Mechanical properties of municipal solid waste. Sardinia '01 - 8th International Waste Management and Landfill Symposium, *Proceedings*, Vol. III, pp. 415-424, Cagliari, Italy.

KNOCHENMUS, G.; WOJNAROWICZ, M. e VAN IMPE W. F. (1998). Stability of Municipal Solid Wastes. Third International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, *Proceedings*, Sêco e Pinto (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 006x, pp. 977-1000.

MALVERN, L. E. (1969) *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*. Prentice-Hall.

MANASSERO, M.; VAN IMPE, W. F.; & BOUAZZA, A. (1996). Waste disposal and containment. 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, *Proceedings*, pp. 193-242, Osaka, Japão.

MARQUES, A. C. M., VILAR, O. M., KAIMOTO, L. S. (2002). Compactação de Resíduos Sólidos Urbanos. Solos e Rochas, ISSN 0103-7021, v. 25, No 1, pp. 37-50.

MASE, G. T.; MASE, G. E. (1999). Continuum Mechanics for Engineers. CRC Press, 2nd ed, ISBN 0-8493-1855-6.

MCDUGALL, J. (2007). A hydro-bio-mechanical model for settlement and other behaviour in landfilled waste. Computers and Geotechnics, v.4, No 4, pp. 229-246.

NADER, J. J. (2014). Elasticidade Linear. Apostila do curso de Modelos Constitutivos do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

NASCENTES, C. R. (2003). Coeficiente de Dispersão Hidrodinâmica e Fator de Retardamento de Metais Pesados em Solo Residual Compactado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, M.G, 131 p.

PALMA, J. H. (1995). Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos. Tesis Doctoral. ETSCCP, Universidad de Cantabria, Espanha.

PEREIRA, A. G. H. (2000). Compresibilidad de los residuos sólidos urbanos. Tese de doutorado, Universidad de Oviedo, Espanha.

DINIS, L. (2005). Viscoelasticidade. Mecânica não linear. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Acessível em <https://web.fe.up.pt/~ldinis/viscoelasticidade.pdf>

PINTO, C. S. (2000). Curso Básico de Mecânica dos Solos. São Paulo. Oficina de Textos.

REDDY, K. R.; HETTIARACHCHI, H.; PARAKALLA, N. S.; GANGATHULASI, J.; BOGNER, J. E. (2009). Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA. Waste Management, v. 29, pp. 952–959.

SANTOS, S. M.; JUCÁ, J. F. T.; ARGÃO, J. M. S. (1998). Geotechnical properties of a solid waste landfill: Muribeca's case. 3th International Congress on Environmental Geotechnics, Proceedings, Lisboa, Portugal.

SCHNEIDE, R. (2010). Biodegradação de RSU. Palestra. EPUSP, São Paulo.

SIMÕES, G. (2000). Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos. Tese de doutoramento, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SOWERS, G. F. (1973) Settlement of waste disposal fills. 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Proceedings, v. 22, pp. 207-210, Moscou, Russia.

ŠUKLJE, L. (1969). Rheological Aspects of Soil Mechanics. Great Britain. John Wiley & Sons, Inc.

VAN ELK, A. G. H. P. (2001). Compressibilidad de los Residuos Sólidos Urbanos. Tese de Doutorado. Universidade de Oviedo, Espanha.

VAN ELK, A. G. H. P.; MANAS, L. M. S.; BOSCOV, M. E. G. (2014). Field survey of compressibility of municipal solid waste. Soils & Rocks, v. 37, p. 85-95.

VAN MEERTEN, J. J., SELLMEIJER, J. B.; PEREBOOM, D. (1995). Prediction of landfill settlements. Sardinia'95, 5th International Landfill Symposium, CISA, Proceedings, Cagliari, Italy.

VILAR, O. M.; CARVALHO, M. F. (2002). Shear strength properties of municipal solid waste. 4th International Congress on Environmental Geotechnics, Proceedings, v. 1, pp. 59-64, Rio de Janeiro, Brasil.

VILAR, O. M.; MARQUES, A. C. M.; CARVALHO, M. F.; MACHADO, S. L. (2006). Some remarks on the mechanical properties and modeling of Municipal Solid Waste. Simpósio Internacional de Tecnologia e Tratamento de Resíduos Sólidos - SITTRS, Rio de Janeiro.

WALL, D. K.; ZEISS, C. (1995) Municipal landfill biodegradation and settlement. Journal of Environmental Engineering, ASCE, v. 121, N° 3, pp. 214-224.

ZEKKOS, D. P. (2005). Evaluation of static and dynamic properties of municipal solid waste. Ph.D.Thesis, University of California, Berkeley, USA.

ZEKKOS, D.; ATHANASOPOULOS, G. A.; BRAY, J. D.; GRIZI, A.; THEODORATOS, A. (2010). Large-scale direct shear testing of municipal solid waste. Waste Management, v. 30, pp. 1544–1555.

ZIEGLER, F. (1995) Mechanics of Solids and Fluids. Springer.

ZIMMERMAN, R.E.; CHEN, W. W. H.; FRANCKIN, A. G. (1977). Mathematical model for solid waste settlement. Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials, ASCE, Proceedings, pp. 210-226, Ann Arbor, EUA.