

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**

THIAGO MARCEL OSHIRO CAMPI

Estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e do módulo de elasticidade dos resíduos sólidos urbanos utilizando resultados de ensaios de placa em aterro sanitário

São Paulo
2011

THIAGO MARCEL OSHIRO CAMPI

Estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e do módulo de elasticidade dos resíduos sólidos urbanos utilizando resultados de ensaios de placa em aterro sanitário

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

Área de Concentração:
Engenharia Geotécnica

Orientadora:
Prof. Dra. Maria Eugenia Gimenez Boscov

São Paulo
2011

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Campi, Thiago Marcel Oshiro

Estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e do módulo de elasticidade dos resíduos sólidos urbanos utilizando resultados de ensaios de placa em aterro sanitário / T.M.O. Campi. -- São Paulo, 2011.

117 p.

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

1. Aterros sanitários 2. Geotecnia 3. Estabilidade 4. Resíduos sólidos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II. t.

CAMPI, T. M. O. Estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e do módulo de elasticidade dos resíduos sólidos urbanos utilizando resultados de ensaios de placa em aterro sanitário. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dra. Maria Eugenia Gimenez Boscov (orientadora)

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Julgamento: _____

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá

Universidade Federal de Pernambuco

Julgamento: _____

Prof. Dr. Roberto Francisco de Azevedo

Universidade Federal de Viçosa

Julgamento: _____

À minha esposa, Elisa,
pelo amor, incentivo, paciência e auxílio,
principalmente durante o desenvolvimento
deste trabalho

À minha filha, Terumi,
por transbordar sua estonteante alegria sobre
mim nos momentos em que mais precisei

Aos meus pais, Odilon e Sheila,
pelo exemplo, dedicação e doação sem os
quais eu jamais teria concluído mais esta
conquista em minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Maria Eugenia Boscov que, além de ter exercido papel fundamental na elaboração deste trabalho, orientando-o, tornou-se uma grande amiga e parceira profissional.

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

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo financiamento do projeto de pesquisa que culminou nesta dissertação de mestrado.

À Estre Ambiental S/A, na figura do Sr. Élio Cherubini, por autorizar a realização dos ensaios de placa no Centro de Gerenciamento de Resíduos Itapevi e na figura do Sr. Afonso Pazin por fornecer todo o subsídio necessário para tal.

À Bureau de Projetos, na figura do Sr. Salvoni pelas preciosas dicas na elaboração do método e na interpretação dos ensaios de placa, e na figura do Sr. Gilmar Silva pela excelente atuação em campo, contornando com maestria todos os imprevistos que ocorreram.

Aos professores da Escola Politécnica Marcos Massao Futai e José Nader pelas valiosas contribuições ao longo da pesquisa científica.

À Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB, por aprovar a realização do curso de mestrado no âmbito de seu Programa de Capacitação.

Aos amigos engenheiros: João Antonio Fuzaro, Pedro José Stech, Cristiano Kenji Iwai, Sidney Shinke e Valéria Soares que, cada um a sua maneira, auxiliaram no desenvolvimento desta pesquisa com suas opiniões e ricas discussões técnicas sobre o tema.

Aos amigos Humberto Alexandre Proença Pereira, Rui Roberto Rodrigues Veiga, Flavio Perez Barros e Daniel Dias Ferreira que, mesmo não exercendo funções em minha área de atuação, contribuíram imensamente para a minha paz de espírito em nossos alegres encontros, principalmente durante o período de desenvolvimento do mestrado.

Se pude enxergar mais longe do que
outros homens foi porque estive sobre os
ombros de gigantes

Sir Isaac Newton

RESUMO

CAMPI, T. M. O. **Estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e do módulo de elasticidade dos resíduos sólidos urbanos utilizando resultados de ensaios de placa em aterro sanitário.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

A verticalização dos aterros sanitários é decorrência da escassez de locais para construção próximos a áreas urbanas e da tendência de centralização da disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU). Como consequência, a questão da estabilidade dos grandes maciços sanitários tem-se tornado mais relevante no meio técnico e científico. Para a análise da estabilidade dos aterros sanitários, utilizam-se os métodos de equilíbrio limite da Geotecnia; porém, além de mais deformáveis do que os solos, os RSU não apresentam indícios de ruptura mesmo para elevadas deformações quando submetidos a ensaios de laboratório e campo. Os parâmetros de resistência são estimados; neste caso, considerando-se como tensões de ruptura aquelas associadas a níveis aceitáveis de deformação; podem ser também estimados a partir de retroanálises de rupturas de casos reais. A magnitude do intervalo de valores de coesão e ângulo de atrito na literatura especializada é muito elevada; mesmo os intervalos mais estreitos para RSU nacionais baseiam-se ainda em poucas pesquisas e estudos de caso, sendo necessárias novas contribuições para estabelecer definitivamente valores de projeto para aterros sanitários brasileiros. Outra abordagem para avaliar a estabilidade geotécnica de maciços sanitários é estimar deslocamentos e deformações resultantes do peso próprio dos RSU e das sobrecargas que ocorrem durante a ocupação do aterro e na situação de final de construção, comparando valores estimados com limites aceitáveis. É necessário, para tal, conhecer o comportamento tensão-deformação e parâmetros reológicos dos RSU, ainda mais raros na literatura do que os parâmetros de resistência. Nesta pesquisa, foram realizados quinze ensaios de placa em um aterro sanitário de grande porte, com o objetivo de estimar os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU pela retroanálise da ruptura e o módulo de elasticidade dos RSU por fórmulas elásticas e por simulação numérica do desenvolvimento do ensaio, com vistas a posteriores análises tensão-deformação do maciço sanitário. Não ocorreu a ruptura em nenhum dos ensaios realizados, não sendo possível estimar os parâmetros de resistência. Por outro lado, obtiveram-se valores do módulo de elasticidade entre 1 e 4 MPa, coerentes com outros dados da bibliografia.

Palavras-chave: aterros sanitários, geotecnia, estabilidade, resíduos sólidos

ABSTRACT

CAMPI, T. M. O. **Evaluation of shear strength parameters and Young's modulus of municipal solid waste (MSW) by means of *in-situ* plate load tests.** M.Sc. Thesis – Polytechnic School of the University of Sao Paulo, Sao Paulo, 2011

MSW landfills are getting higher and steeper as a consequence of the scarcity of available disposal sites in urban areas and of the tendency to centralize the disposal of municipal solid waste (MSW), so that the stability of voluminous waste masses is an important issue among geotechnical engineers. Stability analysis of MSW landfills is carried out using the same limit equilibrium methods of current use for soil slopes. However, MSW are more deformable than soils and do not present signs of failure even under high strains in laboratory and field tests. Shear strength parameters are evaluated therefore considering as failure stresses those correspondent to acceptable levels of strain; or by means of back-analysis of real failures in MSW landfills. The range of values of cohesion and friction angle thus obtained is very wide; more limited ranges, specific for Brazilian MSW, are still based in a few researches and case studies, indicating the need for new contributions to establish design parameters. Other approach to analyze stability of MSW landfill is to evaluate strains due to self weight and surcharge during operation and end-of-construction. In this case, stress-strain behavior and rheological parameters of MSW are necessary, which are still rarer in the specialized literature than shear strength parameters. In this research, 15 plate load tests were carried out in an important MSW landfill in the metropolitan region of São Paulo in order to estimate shear strength parameters, by means of failure back-analysis, and Young's modulus, by means of elastic equations and numerical simulation of the tests. Failure did not occur in any of the 15 tests, so that shear strength parameters could not be evaluated. On the other hand, Young's modulus varied from 1 to 4 MPa, which is coherent with data from the literature.

Key words: sanitary landfills, geotechnics, stability, solid wastes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	ESTABILIDADE GEOTÉCNICA DE ATERROS SANITÁRIOS	16
3.2	COMPOSIÇÃO DOS RSU	23
3.3	COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS RSU	29
3.4	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RSU	33
3.5	RECALQUES DE MACIÇOS DE RSU	37
3.6	RECALQUES IMEDIATOS E DEFORMABILIDADE DOS RSU	42
3.7	CAPACIDADE DE CARGA DE SAPATAS	50
3.8	ENSAIO DE PLACA	52
4	MATERIAIS E MÉTODOS	54
4.1	PLANO DE PESQUISA	54
4.2	O ATERRO SANITÁRIO	54
4.3	ENSAIOS DE PLACA	55
4.4	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	62
4.5	DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE	64
5	RESULTADOS	69
5.1	ENSAIOS DE PLACA	69
5.2	DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	75
5.3	DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE E DOS RSU	77
5.4	APLICAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	89
6	CONCLUSÕES	92
7	SUGESTÕES PARA PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA	95
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - RUPTURA DO ATERRO DE PAYATAS, FILIPINAS (KAVAZANJIAN; MERRY, 2005)	16
FIGURA 3.2 - IMAGEM DE SATÉLITE DO ATERRO DE LEUWIGAJAH APÓS A RUPTURA (KÖLSCH ET AL., 2005)	17
FIGURA 3.3: ATERRO DE LEUWIGAJAH APÓS RUPTURA (KAVAZANJIAN, 2010).....	17
FIGURA 3.4: ATERRO DE LEUWIGAJAH APÓS RUPTURA (KÖLSCH)	18
FIGURA 3.5 - RUPTURA DO ATERRO DE RUMPKE (EUA) EM 1996 (KÖLSCH).....	18
FIGURA 3.6 – RUPTURA DO ATERRO DE BOGOTÁ (COLOMBIA) EM 1997 (HENDRON, 2006)	19
FIGURA 3.7 – RUPTURA DO ATERRO SANITÁRIO BANDEIRANTES (BRASIL) EM 1991 (BENVENUTO, 2008) .	20
FIGURA 3.8 – RUPTURA DO ATERRO SANITÁRIO SÍTIO SÃO JOÃO (BRASIL) EM 2007 (BENVENUTO, 2008)	20
FIGURA 3.9 – COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE NO ATERRO SANITÁRIO BANDEIRANTES, T1 (PMSP, 1997)	28
FIGURA 3.10 - COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE NO ATERRO SANITÁRIO BANDEIRANTES, T2 (PMSP, 1997)	29
FIGURA 3.11 - RELAÇÃO TENSÃO-DEFORMAÇÃO TÍPICA DOS RSU (MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996).	31
FIGURA 3.12 - COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DOS RSU: TENSÃO DESVIADORA EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO AXIAL (VILAR ET AL., 2006).....	31
FIGURA 3.13 - COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DOS RSU: DEFORMAÇÃO VOLUMÉTRICA EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO AXIAL (VILAR ET AL., 2006).....	32
FIGURA 3.14 – PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE RSU (MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996)...	34
FIGURA 3.15 –PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE RSU (ZEKKOS ET AL., 2010)	34
FIGURA 3.16 – VALORES DE RESISTÊNCIA DE RSU DE PROJETO (SANCHEZ ALCITURRI ET AL., 1993)....	35
FIGURA 3.17 – PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE RSU OBTIDOS POR ENSAIO DE PLACA EM LABORATÓRIO (AZEVEDO; RIBEIRO; AZEVEDO, 2006)	37
FIGURA 3.18 - CURVA DE COMPRESSÃO DOS RSU (MANASSERO, VAN IMPE; BOUAZZA, 1996)	39
FIGURA 3.19 - MODELO REOLÓGICO COMPÓSITO PARA COMPRESSÃO DOS RSU (MARQUES, 2001)	41
FIGURA 3.20 - RECALQUES E VOLUMES DE LÍQUIDOS PERCOLADOS ACUMULADOS(BOWDERS, 2000).....	44
FIGURA 3.21 - MÓDULOS DE ELASTICIDADE DE RSU (MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996)	45
FIGURA 3.22 - MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DE RSU BASEADO NOS ENSAIOS DE PLACA DE AZEVEDO, RIBEIRO E AZEVEDO (2006)	46
FIGURA 3.23 - MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DE ENSAIOS DE PLACA (SANTOS; JUCÁ; ARAGÃO, 1998)	46
FIGURA 3.24 - CURVA DE RECALQUES OBTIDA EM ENSAIO DE PLACA REALIZADO EM LABORATÓRIO (AZEVEDO; RIBEIRO ; AZEVEDO, 2006)	47
FIGURA 3.25 -RESULTADOS DE ENSAIOS DE PLACA IN SITU EM ATERRO SANITÁRIO (VAN IMPE ET AL.,1994 APUD MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996).....	48
FIGURA 3.26 - VARIAÇÃO DA COMPRESSIBILIDADE DE RSU NOVOS TRITURADOS PARA DIFERENTES TEORES DE UMIDADE GRAVIMÉTRICA.....	49
FIGURA 4.1 - VISTA GERAL DO CGR ITAPEVI	55

FIGURA 4.2 - REGIÕES DE EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE PLACA (IMAGEM DE SATÉLITE OBTIDA POR MEIO DO SOFTWARE <i>GOOGLE EARTH</i> - 26.05.2010)	56
FIGURA 4.3 - INVESTIGAÇÃO PRELIMINAR DAS REGIÕES APTAS PARA SE REALIZAR OS ENSAIOS DE PLACA. ...	57
FIGURA 4.4 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE PLACA NO CGR - ITAPEVI	58
FIGURA 4.6 - ABERTURA DA CAVA PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE PLACA	60
FIGURA 4.7 - REGULARIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE ENSAIOS COM AREIA.....	60
FIGURA 4.8 - ASSENTAMENTO DA PLACA DE AÇO	60
FIGURA 4.9 – POSICIONAMENTO DO MACACO HIDRÁULICO	60
FIGURA 4.10 – MONTAGEM DO ENSAIOS COMPLETA.....	60
FIGURA 4.11 – CAMINHÃO UTILIZADO NOS ENSAIOS	60
FIGURA 4.12 - DIMENSÕES DO CAMINHÃO UTILIZADO COMO ESTRUTURA DE REAÇÃO NOS ENSAIOS DE PLACA	61
FIGURA 4.13 - POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS	61
FIGURA 4.14 – EXTENSÔMETRO	61
FIGURA 4.15 – EFEITOS DO RECALQUE DIFERENCIAL DA PLACA NO CAMINHÃO	62
FIGURA 4.16 - MODELAGEM DO ENSAIO DE PLACA NO SIGMA/W	67
FIGURA 4.17 - MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DA MODELAGEM DO ENSAIO DE PLACA.....	68
FIGURA 4.18 - INTERPOLAÇÃO ENTRE OS NÓS DOS ELEMENTOS FINITOS	68
FIGURA 5.1 - CURVA CARREGAMENTO-RECALQUE PARA O PONTO P7	71
FIGURA 5.2 - CURVAS CARRREGAMENTO-RECALQUE MÉDIO PARA OS PONTOS P1 A P4.....	71
FIGURA 5.3 - CURVAS CARRREGAMENTO-RECALQUE MÉDIO PARA OS PONTOS P5 A P9.....	72
FIGURA 5.4 - CURVAS CARRREGAMENTO-RECALQUE MÉDIO PARA OS PONTOS P10 A P15.....	72
FIGURA 5.5 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA OS PONTOS P1 A P4	73
FIGURA 5.6 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA OS PONTOS P5 A P9	74
FIGURA 5.7 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA OS PONTOS P10 A P15	74
FIGURA 5.8: RECALQUES A 6 TF PARA OS ENSAIOS DE PLACA REALIZADAS NA CAMADA 10	75
FIGURA 5.9 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RSU NO PONTO P7	76
FIGURA 5.10 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RSU NO PONTO P8	76
FIGURA 5.11 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RSU NO PONTO P9	77
FIGURA 5.12 - VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE CALCULADO POR EQUAÇÃO ELÁSTICA PARA OS PONTOS P1 A P4	80
FIGURA 5.13 - VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE CALCULADO POR EQUAÇÃO ELÁSTICA PARA OS PONTOS P5 A P9	80
FIGURA 5.14 - VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE CALCULADO POR EQUAÇÃO ELÁSTICA PARA OS PONTOS P10 A P15	81
FIGURA 5.15 – E_{P1} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	82
FIGURA 5.16 - E_{P2} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	82
FIGURA 5.17 – E_{P3} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	82
FIGURA 5.18 - E_{P4} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	82
FIGURA 5.19 – E_{P5} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	83
FIGURA 5.20 - E_{P5} , MODELO ELASTO-PLÁSTICO	83

FIGURA 5.21 – E _{P6} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	83
FIGURA 5.22 - E _{P6} , MODELO ELASTO-PLÁSTICO	83
FIGURA 5.23 – E _{P7} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	83
FIGURA 5.24 - E _{P7} , MODELO ELASTO-PLÁSTICO	83
FIGURA 5.25 – E _{P8} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	84
FIGURA 5.26 - E _{P8} , MODELO ELASTO-PLÁSTICO	84
FIGURA 5.27 – E _{P9} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	84
FIGURA 5.28 - E _{P9} , MODELO ELASTO-PLÁSTICO	84
FIGURA 5.29 – E _{P10} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	84
FIGURA 5.30 - E _{P10} , MODELO ELASTO-PLÁSTICO	84
FIGURA 5.31 – E _{P11} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	85
FIGURA 5.32 - E _{P11} , MODELO ELASTO-PLÁSTICO	85
FIGURA 5.33 – E _{P12} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	85
FIGURA 5.34 - E _{P12} , MODELO ELASTO-PLÁSTICO	85
FIGURA 5.35 – E _{P13} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	85
FIGURA 5.36 - E _{P13} , MODELO ELASTO-PLÁSTICO	85
FIGURA 5.37 – E _{P14} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	86
FIGURA 5.38 - E _{P14} , MODELO ELASTO-PLÁSTICO	86
FIGURA 5.39 – E _{P15} , MODELO ELÁSTICO-LINEAR	86
FIGURA 5.40 - E _{P15} , MODELO ELASTO-PLÁSTICO	86
FIGURA 5.41: SEÇÃO CRÍTICA DO CGR ITAPEVI NA OCASIÃO DE SEU ENCERRAMENTO.....	90
FIGURA 5.42: FASE DA ESCAVAÇÃO DO TERRENO.....	90
FIGURA 5.43: FASE DE OCUPAÇÃO SIMULADA (5 CAMADAS)	91
FIGURA 5.44: FASE DE OCUPAÇÃO SIMULADA (10 CAMADAS)	91
FIGURA 5.45: FASE DE OCUPAÇÃO SIMULADA (15 CAMADAS)	91

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 3.1 - CARACTERÍSTICAS E PORCENTAGEM EM PESO DOS COMPONENTES DOS RSU (SOWERS, 1973).	23
TABELA 3.2 – COMPOSIÇÃO DE RSU EM DIVERSAS CIDADES DO MUNDO (MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996).....	24
TABELA 3.3 - PORCENTAGEM EM PESO DOS COMPONENTES DOS RSU (LANDVA; CLARK, 1990).....	25
TABELA 3.4 - COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RSU DA CIDADE DE SÃO PAULO (% EM PESO) (FUZARO, 2006)	26
TABELA 3.5 - COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RSU EM DIVERSAS CIDADES BRASILEIRAS (MODIFICADO DE ZANIN E MANCINI (2004) APUD FRÉSCA (2007); DIAS E VAZ (2002) E IBGE.....	26
TABELA 3.6 - PORCENTAGEM EM PESO DE MATÉRIAS CONSTITUINTES DE RSU (BRAY ET AL., 2009).....	28
TABELA 3.7 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO DO ATERRO SANITÁRIO SÍTIO SÃO JOÃO, OBTIDOS POR RETROANÁLISES A PARTIR DA RUPTURA DE 2007 (ECOURBIS AMBIENTAL, 2007).....	36
TABELA 5.1: EXEMPLO DA TABULAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE PLACA.....	70
TABELA 5.2 - MÓDULOS DE ELASTICIDADE CALCULADOS PARA CADA ESTÁGIO DE CARREGAMENTO DOS 15 ENSAIOS DE PLACA.....	79
TABELA 5.3 – MÓDULOS DE ELASTICIDADE OBTIDOS POR SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E PELA EQUAÇÃO DERIVADA DA TEORIA DA ELASTICIDADE.	87

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, são geradas aproximadamente 166.762 t/dia de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), sendo que cerca de 89% desta quantidade é devidamente coletada. (ABRELPE, 2011). Do montante coletado, 57% são dispostos em aterros sanitários e o restante é destinado a vazadouros que não contam minimamente com os sistemas necessários para garantir a proteção ambiental e evitar demais impactos, inclusive no meio sócio-econômico.

Principalmente no caso de municípios de grande porte e regiões metropolitanas, a escassez de áreas disponíveis para construção de aterros sanitários fez com que, nas últimas décadas, os projetos destes empreendimentos objetivassem ocupar de forma mais racional o espaço disponível, resultando na tendência de verticalização. Mais do que isto, o alteamento dos aterros sanitários permite um melhor aproveitamento da onerosa infraestrutura necessária para garantir a qualidade ambiental.

A implantação de grandes aterros só se tornou possível quando os conhecimentos técnicos de engenharia passaram a integrar as rotinas de planejamento, construção e operação dos aterros sanitários. Porém, principalmente no campo geotécnico, a aplicação direta dos conhecimentos existentes pela simples analogia entre as teorias clássicas e os materiais que compõem os maciços sanitários demonstrou certas limitações, haja vista que muitas destas obras romperam.

A análise de estabilidade em aterros sanitários, na forma como é comumente realizada, assume que os RSU rompem segundo uma envoltória de resistência de Mohr-Coulomb, o que permitiria a utilização de métodos de equilíbrio limite tradicionalmente empregados em geotecnia. O objetivo desta abordagem é avaliar as condições que levariam o maciço ao colapso e aplicar fatores de segurança adequados para preveni-lo.

Entretanto, embora os RSU geralmente sejam tratados como material geotécnico em projetos e obras de aterros sanitários, utilizando-se conceitos da mecânica dos solos e métodos de obras de terra, ainda não foi possível caracterizar satisfatoriamente as relações tensão-deformação dos RSU, uma vez que são inúmeras as variáveis que podem interferir em seu comportamento reológico. Composição gravimétrica (porcentagem em peso de cada componente) e idade dos resíduos, condições

climáticas, geometria e qualidade operacional do aterro, são fatores que influenciam significativamente a distribuição de tensões no maciço sanitário e os deslocamentos decorrentes (BOSCOV, 2006).

Pesquisas em diferentes países para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, com base em ensaios laboratoriais, ensaios *in situ* e retroanálises de rupturas, têm resultado em intervalos muito amplos de valores. Portanto, a obtenção de parâmetros confiáveis para os maciços sanitários ainda é um problema, principalmente devido à dificuldade de se obterem amostras representativas, inadequação dos ensaios convencionais quando se utilizam amostras de resíduos, alteração das características dos RSU com o tempo e variabilidade tanto na composição dos resíduos quanto na qualidade operacional dos diferentes empreendimentos.

Dessa forma, uma melhor compreensão do comportamento tensão-deformação e dos mecanismos de ruptura dos RSU faz-se necessária, tanto do ponto de vista da garantia de um fator de segurança adequado, como para a interpretação dos valores calculados.

2 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa foi determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento e o módulo de elasticidade dos RSU por meio de ensaios de placa realizados em um aterro sanitário de grande porte. Pretende-se assim contribuir para o projeto e o monitoramento da estabilidade de aterros sanitários.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Estabilidade geotécnica de aterros sanitários

A estabilidade geotécnica de aterros sanitários é um tema que despertou o interesse do meio técnico/científico a partir do momento em que rupturas nesse tipo de obra começaram a ocorrer. Ao redor do mundo são inúmeros os relatos de casos, sendo que, em muitos deles, os danos ambientais, econômicos e sociais podem ser de difícil mitigação.

Entre as rupturas notáveis mencionadas em artigos científicos e oficinas técnicas destacam-se as dos aterros de Payatas (Figura 3.1) nas Filipinas em 2000 (KAVAZANJIAN; MERRY, 2005) e de Leuwigajah (Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.4) na Indonésia em 2005. No primeiro, uma população de cerca de 330 pessoas foi diretamente atingida por um volume de 16.000 m³ de resíduos, das quais apenas 58 foram resgatadas com vida (MERRY; KAVAZANJIAN; FRITZ, 2005). Já no aterro de Leuwigajah, a movimentação de 2.700.000 m³ de resíduos resultou na morte de 147 pessoas (KÖLSCH et al., 2005).

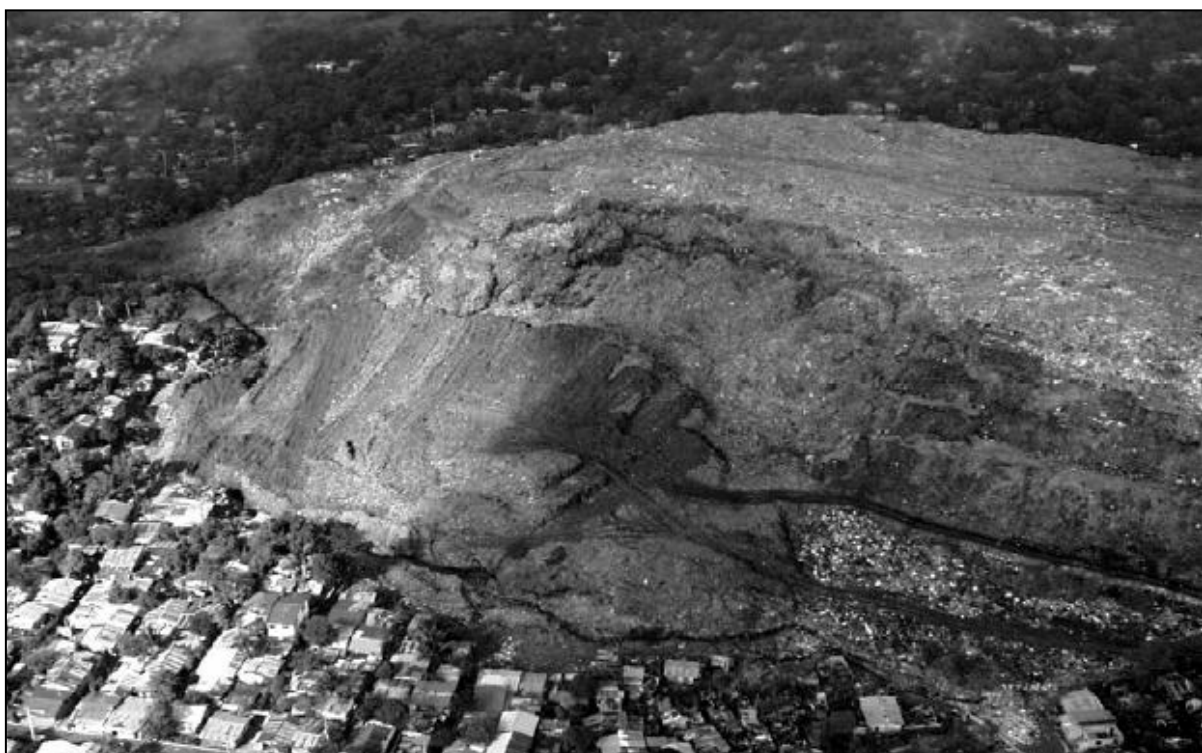


Figura 3.1 - Ruptura do aterro de Payatas, Filipinas (KAVAZANJIAN; MERRY, 2005)



Figura 3.2 - Imagem de satélite do aterro de Leuwigajah após a ruptura (KÖLSCH et al., 2005)



Figura 3.3: Aterro de Leuwigajah após ruptura (KAVAZANJIAN, 2010)



Figura 3.4: Aterro de Leuwigajah após ruptura (KÖLSCH)

Casos envolvendo perda de vidas humanas também ocorreram nos EUA e na Turquia. Em 1972, o aterro de Bufallo nos EUA sofreu uma ruptura que resultou em 118 mortos e 4.000 desabrigados. Em 1993, na Turquia, o aterro de Umraniye-Hekimbasi rompeu, resultando na morte de 39 pessoas (BLIGHT; FOURIE, 2005).

Grandes rupturas que não tiveram como consequência a perda de vidas humanas ocorreram nos aterros de Rumpke nos EUA em 1996 (Figura 3.5), com a movimentação de 1.200.000 m³ de resíduos (KÖLSCH), e Dona Juana em 1997 (Figura 3.6) na Colômbia, com movimentação de 800.000 m³ de resíduos (HENDRON, 2006).

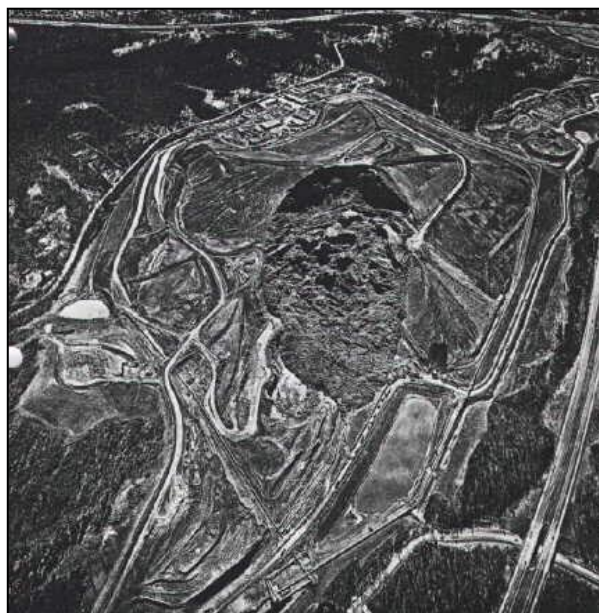


Figura 3.5 - Ruptura do aterro de Rumpke (EUA) em 1996 (KÖLSCH)



Figura 3.6 – Ruptura do aterro de Bogotá (Colombia) em 1997 (HENDRON, 2006)

No Brasil, os estudos relativos à estabilidade e monitoramento geotécnico de maciços de resíduos começaram a se intensificar a partir da ruptura de 1991 da fase AS-1 do aterro sanitário Bandeirantes no município de São Paulo, na qual 65.000 m³ do maciço de resíduos escorregaram em direção à Rodovia dos Bandeirantes (Figura 3.7). Outros acidentes envolvendo grandes volumes de resíduos foram registrados nos anos subseqüentes em diversos municípios, tanto em aterros sanitários de grande porte, quanto em vazadouros mal-operados e sem as devidas licenças ambientais: Itapecerica da Serra (8.000 m³, em 1992), Mauá (100.000 m³, em 1995), Itaquaquecetuba (cerca de 300.000 m³, em 2000), Juiz de Fora (70.000 m³, em 2004), Guarujá (40.000 m³, em 2004), Itapecerica da Serra (150.000 m³, em 2006) e São Paulo (220.000 m³, em 2007, Figura 3.8), citados por Benvenuto (2008), e o último deles, em Itaquaquecetuba (450.000 m³, em 2011), citado em ABMS.



Figura 3.7 – Ruptura do aterro sanitário Bandeirantes (Brasil) em 1991 (BENVENUTO, 2008)



Figura 3.8 – Ruptura do aterro sanitário Sítio São João (Brasil) em 2007 (BENVENUTO, 2008)

Na avaliação da estabilidade de aterros sanitários, a prática atual da engenharia utiliza os métodos de equilíbrio limite para análise de estabilidade de taludes em solos consagrados na Geotecnia.

O desenvolvimento de superfícies de descontinuidade (superfícies de ruptura) em um maciço de solo, com a conseqüente movimentação das partes, é um problema dinâmico complexo, envolvendo ruptura progressiva. Do ponto de vista prático, as análises se restringem à situação de equilíbrio estático de uma massa de solo, considerada um corpo rígido-plástico, na iminência do colapso, ou seja, de entrar em processo de escorregamento. O método que decorre dessa simplificação denomina-se Método do Equilíbrio Limite (a rigor, equilíbrio estático limite) (HACHICH, 1978).

Para o cálculo da distribuição de tensões em maciços de solos recorre-se geralmente a análises bidimensionais, adotando-se a hipótese de estado plano de deformações. Contudo, a análise das tensões e deformações continua um problema estaticamente indeterminado. É necessário ainda fixar a condição de contorno; os processos usuais de análise de estabilidade em Geotecnia pressupõem a forma da diretriz da superfície de escorregamento, com base na observação de colapsos reais ou em modelos (no caso de estado plano de deformações, a superfície é cilíndrica). O novo problema torna-se a solução do sistema constituído pelas equações de equilíbrio e pelo critério de plastificação de Mohr-Coulomb. A partir das forças atuantes, por meio das três equações de equilíbrio da estática (somatórias de esforços na vertical e horizontal e de momentos nulas) aplicadas à massa de solo na iminência da ruptura, são determinadas as tensões normais e de cisalhamento induzidas ao longo da superfície de escorregamento. Essas tensões são comparadas com a resistência ao cisalhamento do solo. Considera-se como fator de segurança a razão entre as resistências disponíveis e as mobilizadas ao longo da superfície de escorregamento. A posição da superfície mais crítica é determinada por tentativas. Essa superfície pertence a um subconjunto do conjunto das possíveis superfícies de escorregamento, uma vez que a forma foi prefixada.

Os processos usuais podem ser divididos em dois, os que consideram a massa que escorrega como um todo e os que a dividem em partes, geralmente em lamelas. Há vários métodos de equilíbrio limite que utilizam o processo de lamelas e que se diferenciam pela forma da superfície de escorregamento e pelas hipóteses

simplificadoras relativas às forças entre lamelas. Os mais difundidos (Fellenius, Bishop Simplificado, Spencer, Janbu, entre outros) encontram-se em *softwares* disponíveis comercialmente, utilizados corriqueiramente em projetos de engenharia.

A despeito dos RSU, muito mais deformáveis do que o solos, se afastarem ainda mais do modelo rígido-plástico, procede-se à análise da estabilidade de maciços sanitários utilizando-se os métodos e softwares geotécnicos, adotando-se a envoltória de Mohr-Coulomb para representar o comportamento à ruptura dos RSU e estimando-se os correspondentes parâmetros de resistência ao cisalhamento. Segundo Bray et al. (2009), a análise de estabilidade em aterros sanitários não pode ser mais confiável do que a confiabilidade da estimativa da resistência ao cisalhamento dos resíduos.

Considerando-se que se trata de uma simplificação de uma situação real complexa e muitas vezes desconhecida (no caso de aterros muito antigos, mal operados e/ou sem projeto de implantação), os resultados destes cálculos podem eventualmente não representar as reais condições de estabilidade do aterro sanitário estudado.

Exemplos recentes podem ser mencionados: em 2007 e 2011; dois aterros sanitários de grande porte da região metropolitana de São Paulo sofreram rupturas parciais, sendo que os fatores de segurança calculados mensalmente para as seções críticas não indicaram qualquer indício de ruptura iminente (CETESB, 2000; 2006). Assim, em face das particularidades, incertezas e simplificações necessárias à modelagem do comportamento deformacional dos aterros sanitários, na prática, a segurança destes empreendimentos também é avaliada pela análise dos dados obtidos em instrumentação de monitoramento geotécnico, como marcos superficiais e piezômetros. Os limites de intervenção e alerta para velocidades de deslocamentos verticais e horizontais são empíricos, baseados na experiência do projetista e/ou empreiteiro.

Outra abordagem para avaliação da estabilidade de aterros sanitários, alternativa aos métodos de equilíbrio limite, seria a análise dos deslocamentos e deformações resultantes do peso próprio do maciço sanitário e sobrecargas, comparando valores estimados com limites aceitáveis. Para isso, é necessário conhecer o comportamento tensão-deformação dos RSU, estimar os parâmetros

correspondentes e realizar simulações numéricas das diversas etapas de construção do aterro e da situação de final de construção.

3.2 Composição dos RSU

Os sistemas de proteção ambiental dos locais de disposição são determinados pela classificação dos resíduos sólidos a serem dispostos, a qual contempla sua origem e suas características físico-químicas; pouca ou nenhuma relevância é atribuída ao comportamento mecânico dos resíduos. Por outro lado, durante a operação destes empreendimentos os engenheiros são freqüentemente confrontados com problemas de ordem geotécnica, que podem envolver potenciais riscos à integridade dos maciços de resíduos (KNOCHENMUS; WOJNAROWICZ; VAN IMPE, 1998).

Os RSU são compostos por materiais muito variados, que apresentam propriedades físicas e químicas distintas. A Tabela 3.1 apresenta as principais características de cada componente dos RSU segundo Sowers (1973).

Tabela 3.1 - Características e porcentagem em peso dos componentes dos RSU (SOWERS, 1973).

Componente	%	Características
Resíduos alimentares	10-20	Muito úmido, putrescível, rapidamente degradável, compressível, frágil
Papel, trapos	10-40	Seco a úmido, compressível, degradável, inflamável
Resíduos de jardinagem	10-20	Úmido, putrescível, degradável, inflamável
Plástico	1-2	Seco, compressível, pouco degradável, inflamável
Metais ocos	5-15	Seco, corrosível, pode ser amassado
Metais maciços	1	Seco, fracamente corrosível, rígido
Borracha	5-10	Seco, inflamável, compressível, não pode ser amassado, pouco degradável
Vidro	5-15	Seco, pode ser triturado, pouco degradável
Madeiras de demolição	0-5	Seco, pode ser amassado, compressível, degradável, inflamável
Entulho de construção	0-10	Úmido, pode ser amassado, erodível, pouco degradável
Cinzas, pó	0-5	Úmido, possui características de solo, compressível, pode ser ativo quimicamente e parcialmente solúvel

O comportamento mecânico do maciço sanitário depende das propriedades dos materiais constituintes do RSU e da interação entre eles. A matéria orgânica putrescível é um componente de significativa influência neste comportamento. Além disso, deve-se considerar que a composição dos RSU, que também influencia diretamente seu comportamento mecânico, é variável tanto em nível global, quanto local. Hábitos, costumes e renda da população, sazonalidade, clima, porte e principais atividades econômicas exercidas são fatores que influenciam diretamente nas características dos RSU gerados pelas populações e, conseqüentemente, em suas propriedades geotécnicas.

Manassero, Van Impe e Bouazza (1996) apresentaram dados de caracterização de RSU em diversas cidades do mundo (Tabela 3.2). Nairobi e Cochabamba apresentaram proporções muito superiores de matéria orgânica putrescível nos RSU, reflexo das diferenças econômico-sociais entre o Quênia e a Bolívia em face aos países do hemisfério norte.

Tabela 3.2 – Composição de RSU em diversas cidades do mundo (MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996)

	Metal	Papel/ Papelo	Plásticos	Couro, madeira e borracha	Tecido s	MOP *	Vidro	Outros
Bangkok (Tailândia)	1	25	-	7	3	44	1	19
Pequim (China)	1	5	1	1	-	45	1	46
Nairobi (Quênia)	3	12	5	-	-	74	4	2
Hong-Kong (China)	3	3	-	7	10	15	10	22
Nova Iorque (EUA)	5	22	-	3	-	20	6	46
Istambul (Turquia)	2	10	3	6	3	61	1	14
Genebra (Suíça)	2,5	31	9,5	4	5	28	9	11
Atenas (Grécia)	4	19	7	4	-	59	2	5
Cochabamba (Bolívia)	1	2	3	1	-	71	1	21
Wollongong (Austrália)	3	16	20	-	-	58	2	1

Nos EUA, as porcentagens dos diferentes materiais constituintes dos RSU apresentadas por Sowers (1973), conforme a Tabela 3.1, indicam que as proporções dos materiais constituintes nos RSU àquela época eram significativamente diferentes das encontradas por outros autores em pesquisas mais recentes. No levantamento apresentado por Landva e Clark (1990), nota-se que as proporções de resíduos alimentares, papel e plásticos aumentaram substancialmente nos RSU pesquisados (Tabela 3.3). Muito embora os resíduos estudados por Sowers (1973) e Landva e Clark (1990) sejam oriundos de aterros sanitários estadunidenses, a ausência de informações regionais específicas referentes aos locais geradores dos resíduos pesquisados não permitem maiores correlações entre os resultados dos autores.

Tabela 3.3 - Porcentagem em peso dos componentes dos RSU (LANDVA; CLARK, 1990).

Componente	%
Resíduos alimentares	5-42
Papel	20-55
Resíduos de jardinagem	4-20
Plástico, borracha	2-15
Metal	6-15
Vidro e cerâmica	2-15
Madeira	0,4-15
Entulho de construção	0-10
Cinzas, pó e pedras	0-15

Dados relativos à caracterização de resíduos sólidos da cidade de São Paulo de 1927 a 2003 (Tabela 3.4) demonstram a influência dos hábitos de consumo, da mudança de atividades econômicas e do aumento populacional na caracterização dos RSU; há uma tendência clara de diminuição das porcentagens de matéria orgânica putrescível e um aumento significativo de materiais não degradáveis ou lentamente degradáveis como os plásticos.

Indícios da influência da renda e da densidade populacional na caracterização dos RSU também podem ser observados na Tabela 3.5. Municípios com vocação industrial e de maior densidade populacional tendem a apresentar proporções de matéria orgânica putrescível inferior a municípios agrícolas e de pequeno porte.

Tabela 3.4 - Composição gravimétrica dos RSU da cidade de São Paulo (% em peso) (FUZARO, 2006)

	1927	1957	1969	1976	1991	1996	1998	2000	2003
MOP	83	76	52	63	61	56	50	48	58
Papel/Papelão	13	17	29	21	14	17	19	16	11
Plástico duro/filme	--	--	2	5	11	14	23	17	17
Metal ferroso	2	2	8	4	3	2	2	3	2
Metal não ferroso	--	--	--	0	1	1	1	1	1
Trapo/couro/borracha	2	3	4	3	4	6	3	--	4
Vidro	1	1	3	2	2	2	2	1	2
Terra e pedra	--	--	--	1	1	--	0	2	1
Madeira	--	--	2	2	1	--	1	2	2
Diversos	--	--	--	--	--	3	--	9	1
Embalagem Longa Vida	--	--	--	--	--	--	--	1	1
Pilhas e baterias	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Tabela 3.5 - Composição gravimétrica dos RSU em diversas cidades brasileiras (modificado de Zanin e Mancini (2004) apud Frésca (2007); Dias e Vaz (2002) e IBGE)

	População atual (IBGE)	Plástico	Vidro	Metal	Papel	MOP	Outros
São Carlos/SP (1989)	221.950	9	1	5	21	57	7
Juiz de Fora/MG (1990)	516.247	11	1	3	15	68	2
Manaus/AM (1992)	1.802.014	9	2	4	19	59	7
Lençóis/BA (1993)	10.368	6	2	2	3	62	25
Curitiba/PR (1993)	1.751.907	6	2	2	3	66	21
Rio de Janeiro/RJ (1993)	6.320.446	15	3	4	23	22	33
Araraquara/SP (1996)	208.662	12	1	3	2	82	-
Morro de São Paulo/BA (1997)	--	6	4	2	5	76	7
Arraial de S. Francisco de Mombaça/BA (1999)	--	8	6	4	4	72	6
Feira de Santana/BA (1999)	556.642	15	2	3	11	65	5
Fortaleza/CE (1999)		20	5	5	5	45	20
Botucatu/SP (2000)	127.328	8	2	4	8	74	4
Lamarão/BA (2000)	9.560	8	1	3	12	65	11
Caxias do Sul/RS (2003)	465.564	15	2	2	12	46	23

Entretanto, apesar das tendências observáveis nestes levantamentos, os valores da composição gravimétrica dos resíduos devem ser utilizados com cautela, haja vista que além da carência de dados sobre a caracterização de RSU, restam dúvidas quanto à representatividade dos dados existentes por não haver uma padronização na coleta e no tratamento das amostras estudadas. Mesmo quando especificadas as origens dos resíduos, os métodos de caracterização raramente são apresentados. Ademais, nos trabalhos em que a caracterização dos resíduos não é realizada pelos próprios autores nos locais de coleta de amostras ou execução de ensaios *in situ*, os resultados apresentados de terceiros podem não representar os resíduos de fato dispostos no aterro sanitário; a caracterização pode ter sido realizada na origem da geração dos resíduos, os quais eventualmente podem passar por etapas de gerenciamento, tais como, a compostagem, a segregação para reciclagem e a incineração, o que tornaria os RSU dispostos nos aterros substancialmente diferentes dos RSU gerados pela população.

Quando os resíduos são caracterizados com a finalidade de realizar estudos geotécnicos nos aterros sanitários, o tamanho (PMSP, 1997; BRAY et al., 2006) e o formato (DGGT, 1994; BORGATTO, 2006) das partículas e a maneira com que interagem umas com as outras são propriedades fundamentais a serem determinadas. Além disso, procura-se caracterizar separadamente os resíduos antigos e recém-dispostos, os quais possuem propriedades geotécnicas distintas.

Bray et al. (2009) postularam que partículas com tamanho inferiores a 20 mm não apresentam comportamento de fibras e possuem comportamento geotécnico semelhante ao do solo; em contrapartida, partículas com tamanho superior a 20 mm apresentam comportamento de fibras. Os autores não observaram variações significativas das proporções dos materiais constituintes dos RSU em função da idade dos resíduos (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Porcentagem em peso de matérias constituintes de RSU (BRAY et al., 2009)

	Matérias < 20 mm	Papel	Madeira	Plásticos leves	Cascalhos	Outros	MOP*
RSU com 15 anos	59	12	11	2	10	6	13-23
RSU com menos de 1 ano	72	11	3	3	6	5	11-13
RSU com 2 anos	64	11	9	3	5	8	17-27

Caracterizações de amostras de resíduos de diversas profundidades do aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo foram realizadas em duas sondagens no maciço de resíduos (PMSP, 1997). Considerando que a idade de disposição dos resíduos esteja diretamente relacionada com a profundidade sondada do maciço, da mesma forma como ocorreu para Bray et al. (2009), não se observam indícios de alterações significativas na composição dos RSU (Figura 3.9 e Figura 3.10).

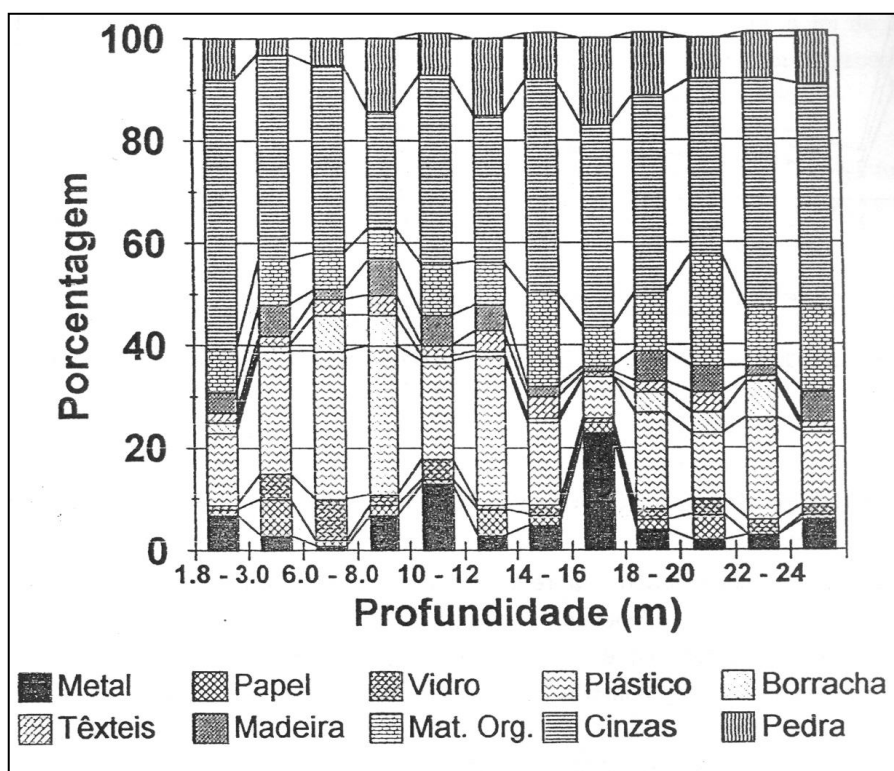


Figura 3.9 – Composição gravimétrica em função da profundidade no aterro sanitário Bandeirantes, T1 (PMSP, 1997)

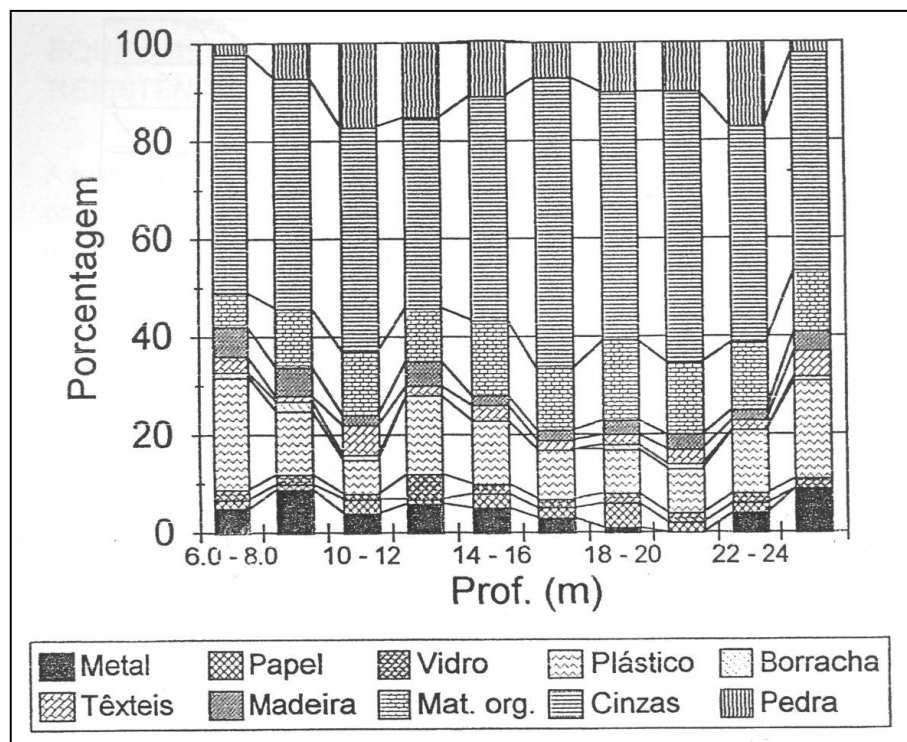


Figura 3.10 - Composição gravimétrica em função da profundidade no aterro sanitário Bandeirantes, T2 (PMSP, 1997)

3.3 Comportamento mecânico dos RSU

Ensaio de laboratório com RSU e acompanhamento de deslocamentos de marcos superficiais em maciços sanitários mostram grandes deformações sem a ocorrência de ruptura; por exemplo, deslocamentos da ordem de 30 cm por dia foram observados no aterro sanitário Bandeirantes, no município de São Paulo, sem que tenham sido observados problemas de estabilidade (CETESB, 2010).

As curvas tensão-deformação de RSU apresentam crescimento das tensões em função do aumento da deformação, sem que se identifique um pico ou uma assíntota para as tensões, mesmo para as deformações máximas atingidas em ensaios usuais de laboratório e campo (MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996; KAVAZANJIAN; MATASOVIC; BACHUS, 1999; VILAR et al., 2006; AZEVEDO; RIBEIRO; AZEVEDO, 2006; BACHUS et al., 2007; BRAY et al., 2009).

Segundo Bray et al. (2009), a resistência ao cisalhamento dos RSU na literatura é definida como a tensão mobilizada correspondente a 5-25% da deformação axial. Para níveis mais baixos de deformação axial (5-10%), considerados mais

semelhantes aos ocorridos no campo, os valores de resistência tendem a ser inferiores aos obtidos em ensaios de cisalhamento direto ou retro-análises de rupturas reais.

Amostras contendo altos teores de fibras aparentam ser mais resistentes do que as que contem baixos teores. Kavazanjian, Matasovic e Bachus (1999) observaram que ensaios de cisalhamento direto em amostras de grande escala com baixo teor de fibras apresentaram-se ligeiramente mais frágeis do que amostras com teor de fibras mais elevado. De fato, Kölsch (1995), introduziu o modelo do “efeito fibra” nos RSU, no qual se considera que as partículas fibrosas (em geral plásticas) atribuem aos resíduos um incremento de resistência ao cisalhamento. Entretanto, apesar de tal efeito ser muito representativo num primeiro momento, tende a desaparecer completamente ao longo do tempo.

Segundo De Lamare Neto (2004), os elementos que atribuem propriedades coesivas aos RSU são os materiais fibrosos, que também contribuem para o incremento em seu ângulo de atrito: inicialmente, as tensões devido ao atrito são mobilizadas, e a partir de certo nível de deformações as propriedades de resistência à tração dos materiais fibrosos começam a atuar, atribuindo uma “pseudo” coesão aos RSU.

Bray et al. (2009) compilaram dados de diversos autores referentes a mais de 100 ensaios de laboratório em RSU. Dentre as observações apresentadas, salienta-se que a preparação de amostras e os procedimentos de ensaio quase nunca são reportados. Além disso, observam-se grandes diferenças relativas ao preparo das amostras e procedimentos de ensaios quando são reportados.

O comportamento dos RSU difere notavelmente em função do tipo de ensaio. Em ensaios de cisalhamento direto, a curva tensão-deformação apresenta-se com formato convexo (aproximadamente hiperbólico), atingindo um valor assintótico a grandes deformações e, algumas vezes, apresentando um pico com posterior redução na resistência. Em ensaios triaxiais, os RSU apresentam freqüentemente uma curva inicialmente convexa, depois quase linear e, por fim, côncava. Não há indícios de um valor assintótico de resistência, tampouco um pico de resistência bem definido, ocorrendo o aumento contínuo da resistência mobilizada mesmo para grandes deformações (por exemplo, Figura 3.11 a Figura 3.13).

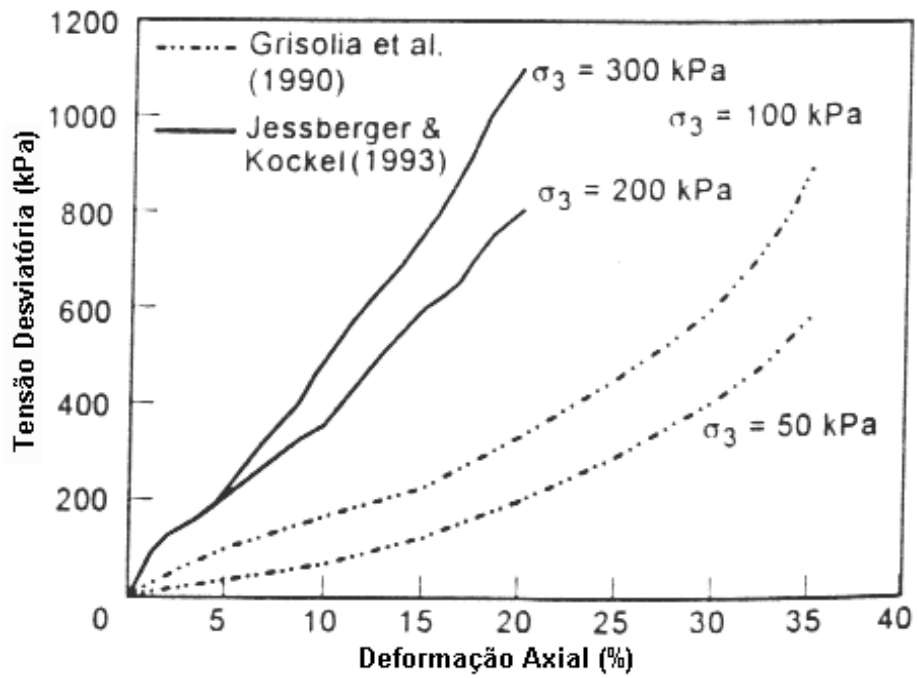


Figura 3.11 - Relação tensão-deformação típica dos RSU (MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996).

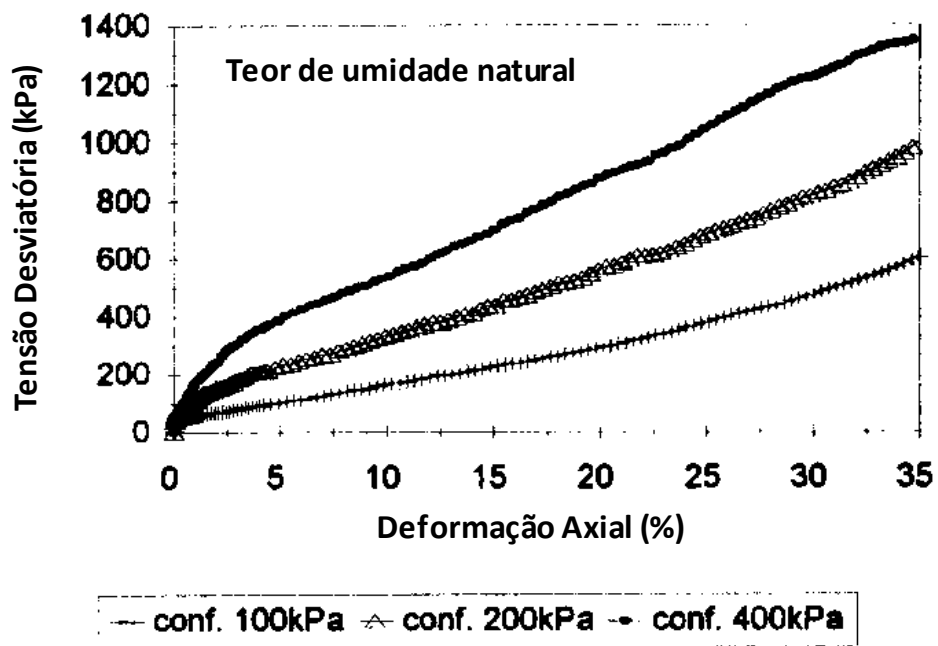


Figura 3.12 - Comportamento tensão-deformação dos RSU: tensão desviadora em função da deformação axial (VILAR et al., 2006).

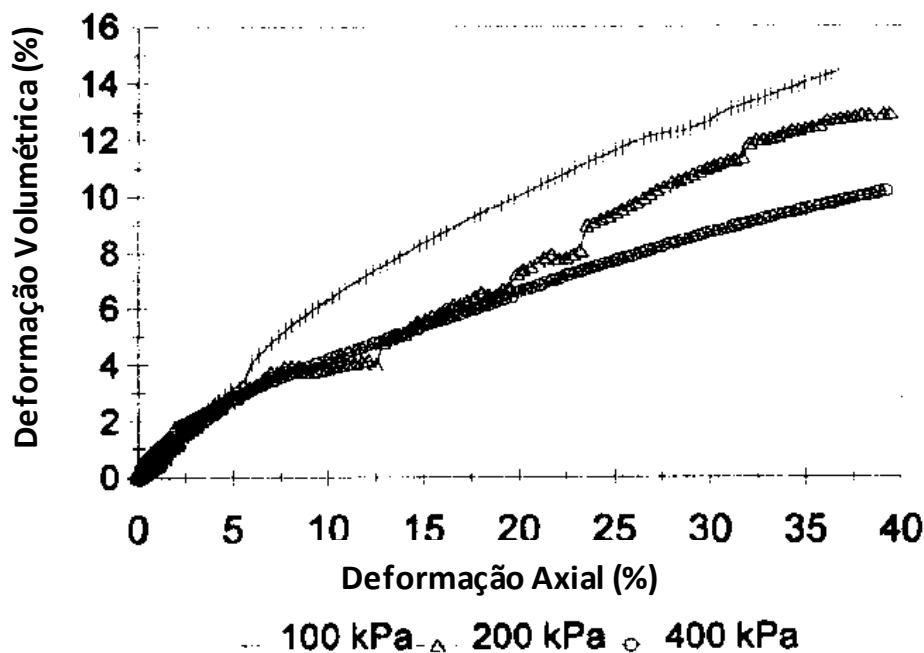


Figura 3.13 - Comportamento tensão-deformação dos RSU: deformação volumétrica em função da deformação axial (VILAR et al., 2006).

Das observações dos diversos ensaios estudados, Bray et al. (2009) apontam as principais dúvidas que ainda pairam sobre a estimativa do comportamento mecânico dos RSU:

- A influência do preparo das amostras para ensaios realizados em laboratório;
- A influência do estado de tensões no comportamento tensão x deformação e na resistência ao cisalhamento, isto é, a discrepância observada na resposta dos RSU ao trinômio tensão x deformação x resistência, entre ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais;
- A influência de carregamentos dinâmicos;
- A influência da degradação;
- A relação de resistências ao cisalhamento determinadas em ensaios de laboratório com valores de resistência de campo de RSU.

Kavazanjian (2006) pondera que mesmo com o advento de novas informações quanto às propriedades mecânicas dos RSU, deve-se levar em consideração que as iniciativas para a coleta seletiva e a redução na geração de resíduos podem influenciar muito tais propriedades no futuro. Em outras palavras, quaisquer estudos que pretendam estimar o comportamento mecânico dos RSU não devem considerar

os resultados obtidos como absolutos, pois tais valores estarão sempre sujeitos às mudanças na gestão dos RSU e nos hábitos de consumo das populações.

3.4 Parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento (c e ϕ) de solos são obtidos em laboratório por ensaios de resistência ao cisalhamento e ensaios de compressão triaxial. A partir das tensões de ruptura e das tensões confinantes determina-se a envoltória de resistência para uma determinada amostra de solo.

Como não há ruptura definida nos ensaios de compressão triaxial para os RSU, pois a resistência é crescente em função da deformação, a coesão e o ângulo de atrito dos RSU são especificados em função de uma tensão arbitrada como sendo a de ruptura, sendo que o critério usual é a tensão relativa à máxima deformação aceitável, o que pode variar de 5 a 40% (KNOCHENMUS; WOJNAROWICZ; VAN IMPE, 1998; BRAY et al., 2009; REDDY et al., 2009).

Pesquisadores por todo mundo buscam parâmetros de resistência adequados para utilização em projetos e acompanhamento do desempenho geotécnico de aterros sanitários, por meio de ensaios de laboratório, ensaios de campo e retroanálise de rupturas reais. Até o momento, os resultados obtidos apresentam um intervalo de valores muito amplo para os parâmetros coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), conforme se observa nas compilações apresentadas por Manassero, Van Impe, e Bouazza (1996) (Figura 3.14) e Zekkos et al. (2010) (Figura 3.15).

Cabe salientar que há consideráveis incertezas associadas aos parâmetros de resistência dos RSU devido à sua heterogeneidade e à dificuldade em coletar e ensaiar amostras representativas, dados os elementos de grandes dimensões contidos nos resíduos (BRAY et al., 2009).

Assim, os parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU apresentam-se com variações desde 0 a 80 kPa para a coesão e 0 a 60° para o ângulo de atrito (BOSCOV; ABREU, 2000; BRAY et al. 2009; ZEKOS et al., 2010). Segundo Boscov e Abreu (2000), nem sempre é possível saber se os valores apresentados na literatura se referem às tensões totais ou efetivas. Alguns projetistas preferem utilizar

altos valores de parâmetros efetivos com pressões neutras também elevadas, enquanto outros preferem utilizar valores de tensões totais (KAVAZANJIAN, 2010).

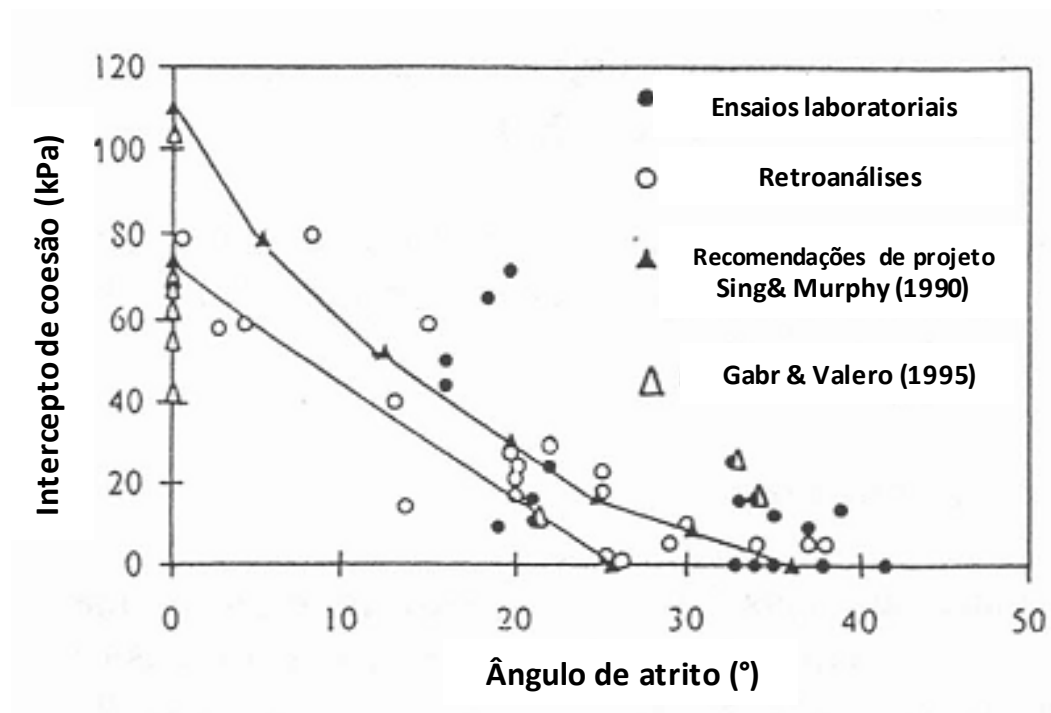


Figura 3.14 – Parâmetros de resistência de RSU (MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996)

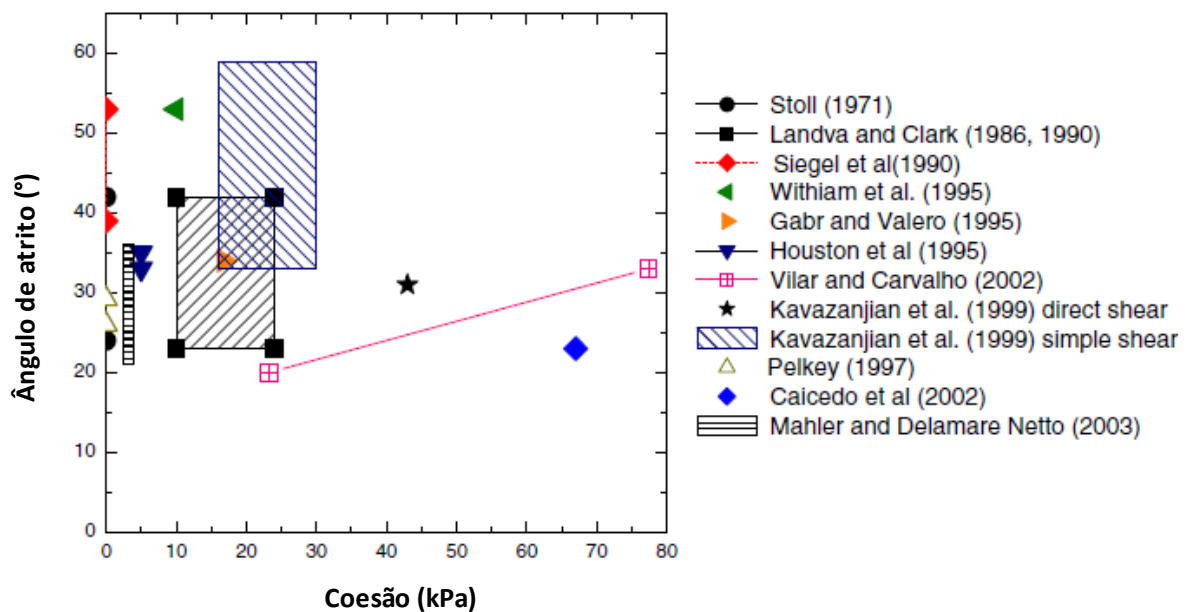


Figura 3.15 – Parâmetros de resistência de RSU (ZEKKOS et al., 2010)

Cabe ressaltar que os valores que delimitam a fronteira superior dos intervalos apresentados na Figura 3.14 e na Figura 3.15 foram obtidos em ensaios laboratoriais executados até grandes deformações, cuja ocorrência seria provavelmente inaceitável em um aterro sanitário. Por outro lado, no caso de ensaios de campo ou retro-análises, Manassero, Van Impe e Bouazza (1996) advertem que há inúmeros pares c/ϕ que satisfazem a condição de equilíbrio (fator de segurança = 1, condição de ruptura ou carregamento último); com base nesse tipo de análise é impossível uma única determinação de parâmetros de resistência.

A grande variabilidade de pares c/ϕ obtidos por diversos autores e das características dos RSU impede uma padronização dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para fins práticos de projeto e monitoramento do desempenho geotécnico de aterros sanitários. Apesar disso, Sanchez Alcuturri et al. (1993) apud Manassero, Van Impe, e Bouazza (1996) propuseram um intervalo de valores de coesão e ângulo de atrito para projeto (Figura 3.16), conservadores face ao grande intervalo observado na literatura.

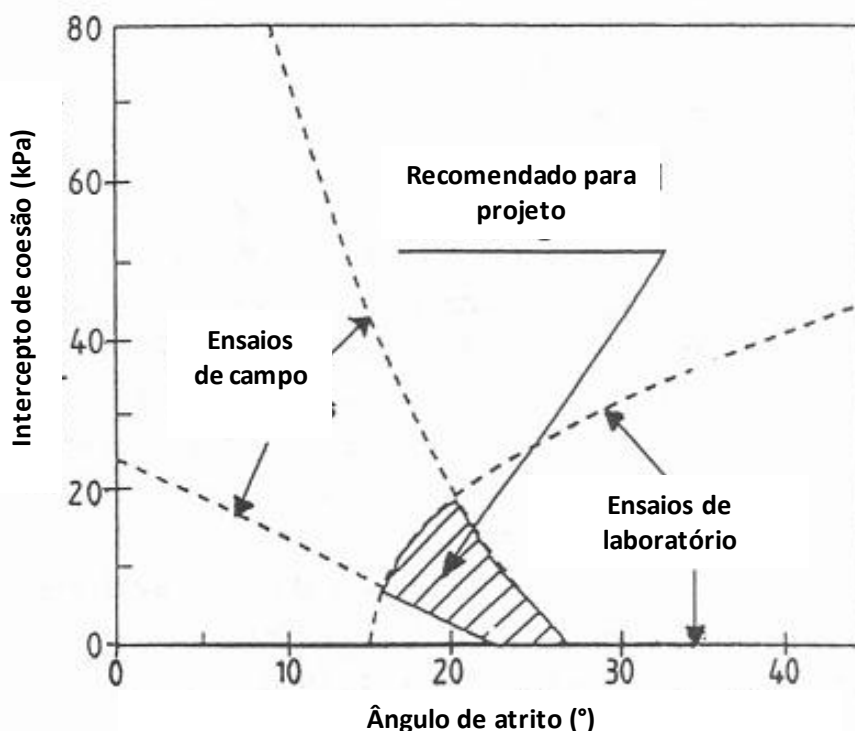


Figura 3.16 – Valores de resistência de RSU de projeto (SANCHEZ ALCITURRI et al., 1993)

No Brasil, a estimativa dos parâmetros de resistência para os RSU baseava-se inicialmente em revisões da literatura internacional, onde constam resultados de resíduos com características significativamente diferentes das dos resíduos brasileiros. Entretanto, retroanálises realizadas a partir da ruptura ocorrida em 1991 no aterro sanitário Bandeirantes constituíram um marco para a estimativa dos parâmetros utilizados nas análises de estabilidade. Inicialmente foram estimados os valores: coesão de 13,5 kPa e ângulo de atrito de 22° (BENVENUTO; CUNHA, 1991). Esses valores tornaram-se referência para projetos nacionais. Mais recentemente, na ruptura ocorrida no aterro sanitário Sítio São João em 2007, novas retroanálises foram realizadas, sendo que os valores obtidos para c e ϕ variaram, respectivamente, de 13,5 a 19 kPa e 22° a 28° (ECOURBIS AMBIENTAL, 2007) (Tabela 3.7). Além disso, pesquisas para estimar os parâmetros de resistência têm sido desenvolvidas em universidades brasileiras (AZEVEDO; RIBEIRO; AZEVEDO, 2006; VILAR et al., 2006; CAMPI; BOSCOV, 2011).

Tabela 3.7 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do aterro sanitário Sítio São João, obtidos por retroanálises a partir da ruptura de 2007 (ECOURBIS AMBIENTAL, 2007)

Idade do resíduo	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Resíduo antigo	13,5	22,0
+Resíduo novo	19,0	28,0

Azevedo, Ribeiro e Azevedo (2006) realizaram ensaios de placa em laboratório utilizando um lisímetro de grandes dimensões (1,0 de diâmetro e 1,6 m de altura) com o objetivo de determinar parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU por meio das fórmulas de capacidade de carga de Terzaghi (1943) para fundações diretas rasas. A placa utilizada era de madeira, com 16,0 cm de diâmetro e 40,0 cm de altura. RSU foram compactados de modo que apresentassem peso unitário de 7,0 kN/m³, equivalente a resíduos recentes pouco compactados, e foram submetidos a 17 estágios de carregamento de 24h. Os parâmetros de resistência obtidos foram significativamente menores do que sugere a literatura (Figura 3.17), enquanto os valores de deformações foram superiores aos obtidos em trabalhos semelhantes. Segundo os autores, em seu trabalho foram realizados ensaios sem alterar as

características granulométricas dos RSU, ao passo que as pesquisas para definir o comportamento reológico dos resíduos geralmente utilizam material selecionado, no qual se eliminam ou trituram as partículas de maiores dimensões, o que modifica substancialmente as características geomecânicas.

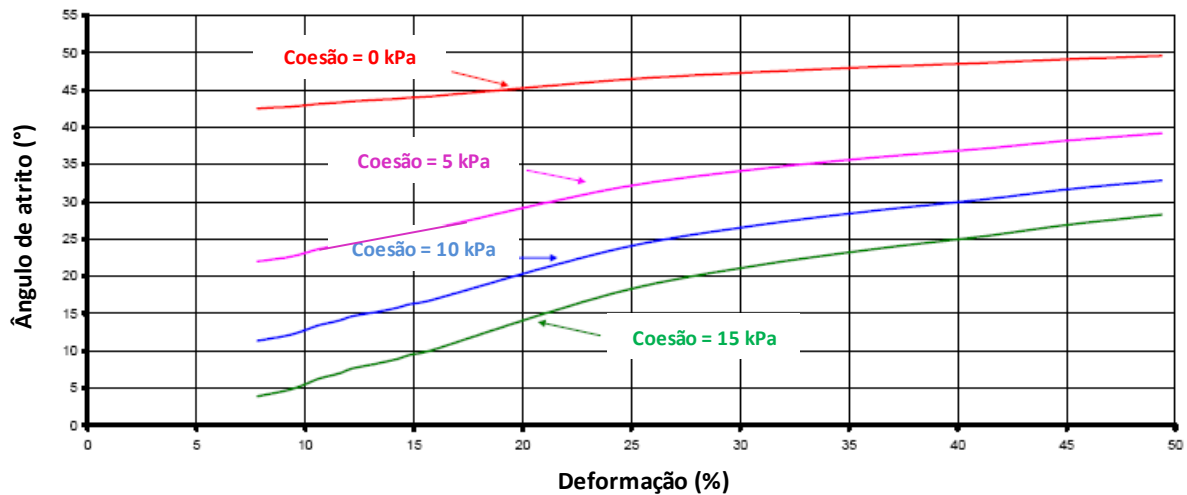


Figura 3.17 – Parâmetros de resistência de RSU obtidos por ensaio de placa em laboratório (AZEVEDO; RIBEIRO; AZEVEDO, 2006)

3.5 Recalques de maciços de RSU

Os principais mecanismos de recalques de maciços de RSU são (SOWERS, 1973):

- *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*: degradação biológica, correspondente à fermentação e degradação dos materiais, causando transferência de massa da fase sólida para as fases líquida e gasosa;
- *Interação*: interação entre os diversos mecanismos. Por exemplo: a combustão espontânea do metano gerado a partir das reações de biodegradação, devido ao calor liberado nessas ou em outras reações; ácidos orgânicos gerados a partir da biodegradação que podem corroer outros materiais; alteração de volume devido ao

mecanismo de solicitação mecânica que pode desencadear o mecanismo de ravinamento interno.

- *Dissipação das pressões neutras de líquidos e gases*: semelhante ao que ocorre no adensamento de solos, representa a deformação resultante da expulsão de líquidos e gases do interior do maciço devido a um carregamento externo, e que demanda certo tempo.

Os três fenômenos responsáveis pela deformação de uma massa de resíduos segundo Huitric (1981) apud Manassero, Van Impe e Bouazza (1996) são:

- *Adensamento* pela dissipação da fase líquida dos RSU recém dispostos
- *Redução volumétrica* devido à decomposição de matéria orgânica, na qual são gerados os líquidos percolados e os gases.
- *Redução volumétrica* devido à sobrecarga, por reorientação das partículas sólidas culminando em uma configuração mais densa; pode ocorrer pela perda gradual da rigidez das partículas sólidas, pelo rearranjo dessas partículas nos vazios sob ação do peso próprio ou de sobrecarga, e redução de tamanho das partículas sólidas em decorrência da decomposição.

Manassero, Van Impe e Bouazza (1996) definiram os principais mecanismos que causam os recalques dos maciços de RSU (Figura 3.18):

- Compressão e arrastamento de partículas devido à distorção, flexão, esmagamento e reorientação;
- Recalques devido à migração de pequenas partículas entre os vazios contidos entre partículas maiores;
- Comportamento viscoso e adensamento envolvendo tanto o conjunto de RSU no maciço quanto as partículas individualmente;
- Recalques devido à decomposição da matéria orgânica;
- Colapso de partículas devido a mudanças físico-químicas como corrosão, oxidação e degradação de componentes inorgânicos.

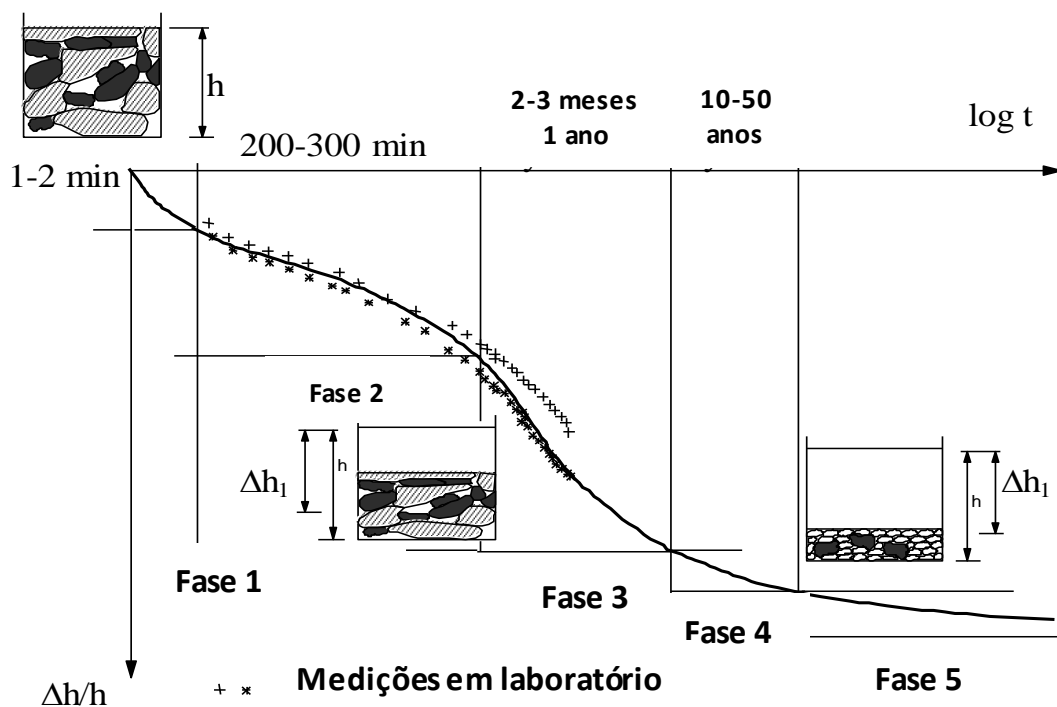


Figura 3.18 - Curva de compressão dos RSU (MANASSERO, VAN IMPE; BOUAZZA, 1996)

A compressibilidade dos RSU em um aterro sanitário dependerá de diversos fatores, tais como, peso unitário inicial e índice de vazios, quantidade de matéria orgânica, altura das camadas de resíduos e sobrecarga, histórico de tensões tanto durante quanto após a disposição, níveis e variação de líquidos percolados e umidade, e produção de biogás (KNOCHENMUS; WOJNAROWICZ; VAN IMPE, 1998).

Segundo Bowders et al. (2000), os recalques em aterros sanitários ocorrem de duas maneiras bem distintas: a primeira diz respeito aos deslocamentos induzidos mecanicamente por sobrecarga e/ou peso próprio dos materiais aterrados. A segunda maneira refere-se aos deslocamentos de longo prazo, que no caso dos RSU são influenciados pela sua composição, devido às diferenças de deformabilidade dos materiais constituintes, e pela biodegradação da matéria orgânica, que resulta em variação volumétrica e geração de líquidos percolados e gases. Deve-se considerar ainda que a dinâmica de deformações em um aterro não é homogênea, haja vista que coexistem, em um mesmo maciço, resíduos com diferentes idades e diferentes comportamentos reológicos. Daí resulta a

preocupação em relação às deformações diferenciais, que podem afetar os sistemas do aterro sanitário, principalmente as camadas de cobertura.

A maioria dos estudos objetiva determinar os recalques finais dos aterros sanitários para auxiliar no planejamento e aproveitamento futuro de volumes disponíveis para disposição de resíduos. Os mecanismos relativos à biodegradação e “creep” (deformação lenta a carga constante), que se estendem ao longo do tempo, têm sido investigados e modelos matemáticos têm sido propostos para representá-los.

A abordagem usual para a estimativa de recalques totais é a utilização de teorias clássicas da mecânica dos solos, o que apresenta bons resultados segundo Sowers (1973), que equiparou as características geotécnicas dos RSU à das turfas, muito embora a compressibilidade dos RSU sofra influência da decomposição biológica da matéria orgânica, processo que não ocorre para as turfas (MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996).

Contudo, grande parte das hipóteses da teoria do adensamento de Terzaghi e de teorias de adensamento de grandes deformações não é atendida pelos RSU. Ademais, necessita-se de valores de índices de vazios e pesos iniciais, heterogêneos e de difícil estimativa para os RSU (KNOCHENMUS; WOJNAROWICZ; VAN IMPE, 1998). Por isso, a estimativa de recalques de aterros sanitários pelas teorias clássicas de mecânica dos solos geralmente resulta em erros e necessita de calibrações por meio de observações de campo (BOWDERS et al., 2000); eventualmente, pode se mostrar precisa, como outros modelos de ajuste empírico, neste caso correspondendo a um relação linear entre o recalque de resíduos novos e o logaritmo da tensão aplicada, e a uma relação linear entre o recalque e o logaritmo do tempo (ABREU, 2000; BOSCOV, 2008).

Outras abordagens para a estimativa de recalques totais de aterros sanitários são os modelos empíricos, que consistem de ajuste de curvas com equações conhecidas a séries históricas de dados, e os modelos teóricos que procuram representar os mecanismos de recalques relevantes para os RSU ou ainda adaptar diferentes modelos reológicos (BOSCOV, 2008).

Por exemplo, Marques (2001) propôs um modelo reológico composto (Figura 3.19) para a compressão dos RSU, o qual considera que as deformações dos resíduos ocorrem segundo três mecanismos de compressão: compressão mecânica

primária, mecanismo que incorpora as deformações que ocorrem em decorrência de tensões verticais, conforme a Teoria do Adensamento de solos; compressão mecânica secundária, mecanismo que incorpora as deformações secundárias pelo processo de fluência do material seja pela ação do peso próprio ou pelas ações de esforços externos; e compressão biológica secundária, mecanismo que incorpora as deformações que ocorrem pela degradação da matéria orgânica putrescível a qual está associada aos processos de perda e transformação de massa.

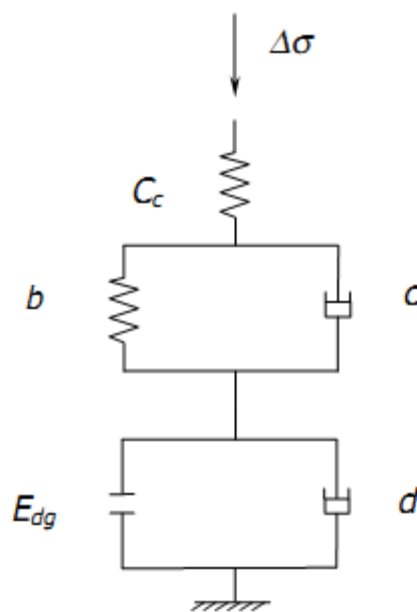


Figura 3.19 - Modelo reológico composto para compressão dos RSU (MARQUES, 2001)

Vilar et al. (2006) fizeram um apanhado dos resultados obtidos por Vilar e Carvalho (2004), Marques et al. (2003) e Machado et al. (2002) e basearam-se em tais dados para propor um modelo para o comportamento mecânico dos RSU. Tal modelo considera que o comportamento dos RSU depende dos materiais fibrosos (plásticos) e da massa de resíduos não fibrosos (madeira, compostos orgânicos, borracha, vidro, água e líquidos gerados durante o processo de decomposição). O comportamento da massa segue o modelo do estado crítico; o comportamento das fibras, um modelo elasto-plástico perfeito. A tensão desviadora imposta aos RSU é parte suportada pelas fibras e parte pela massa. A tensão normal média é considerada a mesma para ambos os materiais. A deformação volumétrica dos

materiais fibrosos é desconsiderada; toda variação no índice de vazios é atribuída à massa. Os parâmetros de expansão e compressão (k e λ) da massa são função do índice de vazios. Utilizou-se uma relação hiperbólica entre a tensão normal média e o índice de vazios.

Há diversos modelos de estimativa de recalques finais disponíveis na literatura especializada. Por outro lado, considera-se que o estudo da compressão de RSU devido a carregamento tem interesse limitado para a prática da engenharia. Segundo Kazavanjian (2006), esse conhecimento é importante no caso de construção de um aterro sanitário sobre um antigo vazadouro de resíduos, de expansão vertical de aterro sanitário existente, e no pós-fechamento, por exemplo, se forem utilizadas fundações rasas ou construídos aterros de certo porte; em linhas gerais, saber que grandes recalques irão ocorrer quando os resíduos forem dispostos é suficiente para se projetar sistemas de impermeabilização e drenagem adequados, e outros elementos do aterro. Contudo, a velocidade de alteamento dos aterros sanitários brasileiros, em função do planejamento de ocupação da área do aterro, pode ser elevada, assim como se observa uma tendência de verticalização dos aterros sanitários até dezenas de metros. A resposta do maciço sanitário ao peso próprio e a sobrecargas torna-se, então, relevante.

Análises de dados de aterros sanitários indicam que os recalques devido ao peso próprio ocorrem entre 10 e 90 dias (BJARNGARD; EDGARDS, 1990 apud BOWDERS, 2000; STULGIS; SOYDEMIR; TELGENER, 1995). Essa parcela de recalques é elevada e chega a corresponder a cerca de 50% dos recalques totais em um aterro sanitário (BOWDERS et al., 2000)

3.6 Recalques imediatos e deformabilidade dos RSU

A Teoria da Elasticidade tem sido empregada para estimar os recalques e tensões provenientes de carregamentos na superfície ou no interior de um maciço de solo, o que é questionável, pois o comportamento dos solos não satisfaz os requisitos de material elástico, principalmente quanto à reversibilidade das deformações quando as tensões mudam de sentido; entretanto, quando ocorrem somente acréscimos de tensão, justifica-se o uso da teoria (PINTO, 2000).

Essas questões também se aplicam à estimativa de tensões e recalques em maciços sanitários: por um lado, o comportamento tensão-deformação dos RSU é ainda mais distante do comportamento de um material elástico; por outro lado, a facilidade de aplicação das soluções elásticas e uma razoável aproximação com o comportamento real sob carregamento crescente explicam seu uso.

Até um determinado nível de tensões, existe certa proporcionalidade entre as tensões e as deformações, possibilitando o uso do modelo elástico linear. Neste caso, os parâmetros a serem determinados para descrever o comportamento tensão-deformação dos RSU são o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

O módulo de elasticidade pode ser obtido por meio de resultados de ensaios de laboratório, retro-análises ou medidas de deslocamentos em campo. Mais desejável seriam ensaios *in situ* que atingissem níveis de deformações elevados (MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996).

Os métodos *in situ* para avaliação da compressibilidade de RSU são os ensaios de placa, pressiômetros e SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*). Esses ensaios determinam parâmetros relativos a uma determinada massa de resíduos atingida pelas solicitações do ensaio. Nos ensaios de placa, a zona de influência dos carregamentos fica restrita às porções superiores do maciço, o que pode resultar em dados pouco realistas, caso a heterogeneidade dos resíduos contida no aterro seja muito alta (KNOCHENMUS; WOJNAROWICZ; VAN IMPE, 1998).

Bachus et al. (2007) estudaram a compressibilidade dos RSU por meio da construção de um aterro de solo sobre um aterro sanitário. O sistema de monitoramento dos recalques instalado era capaz de medir grandes deformações e constituiu-se de 9 placas para monitoramento dos recalques na superfície do aterro sanitário e outras 9 placas para monitoramento dos recalques no interior do maciço, em três profundidades diferentes. A espessura de resíduos sob o aterro de solo era 18,3 m; os autores não fizeram considerações quanto à idade dos resíduos dispostos ao longo da profundidade. O aterro de solo possuía cerca de 42.000 m² de área e alturas diferenciadas, respectivamente 3, 6 e 9 m. Para tensões em torno de 50 kPa, o deslocamento equivalente observado foi em torno de 0,3 m; para 100 kPa, 0,6 m; para 150 kPa, 1,2 m; e para 200 kPa, 1,5 m; infere-se que a cada 50 kPa

houve um acréscimo de 0,3 m nos recalques observados nas placas monitoradas. Os dados de recalques foram monitorados por mais de 100 dias, sendo que nos primeiros 50 dias ocorreu a maior porção dos deslocamentos, cerca de 80% dos recalques totais, independentemente do carregamento sobre o maciço.

Bowders et al. (2000) monitorou deslocamentos de placas de aço em uma célula em atividade (portanto constituída de resíduos novos) no aterro de Columbia (Missouri, EUA), com espessura de RSU de 18 m. Os dados demonstram que 50% do recalque total, de cerca de 0,8% da espessura dos resíduos, ocorreram nos primeiros 30 dias (Figura 3.20), correspondendo à fase na qual os deslocamentos ocorrem estritamente devido aos carregamentos, no caso o peso próprio dos RSU.

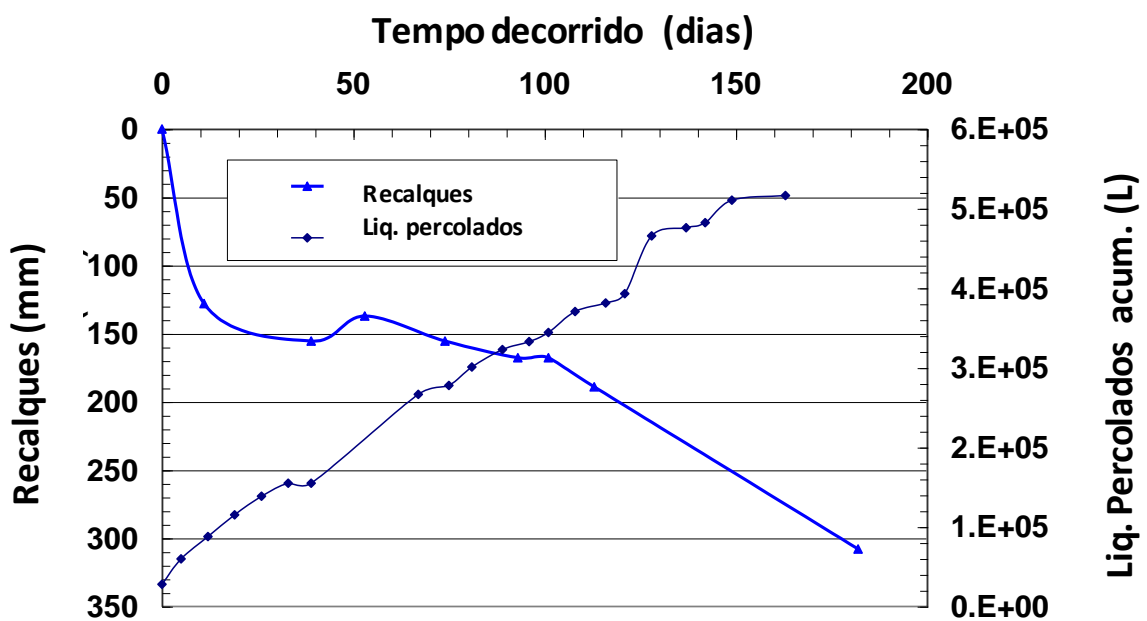


Figura 3.20 - Recalques e volumes de líquidos percolados acumulados(BOWDERS, 2000)

Manassero, Van Impe e Bouazza (1996) compilaram resultados de diversos ensaios de compressibilidade em RSU realizados por vários autores (Figura 3.21). Em linhas gerais, obteve-se que o módulo de elasticidade para os RSU varia entre 500 a 3000 kPa.

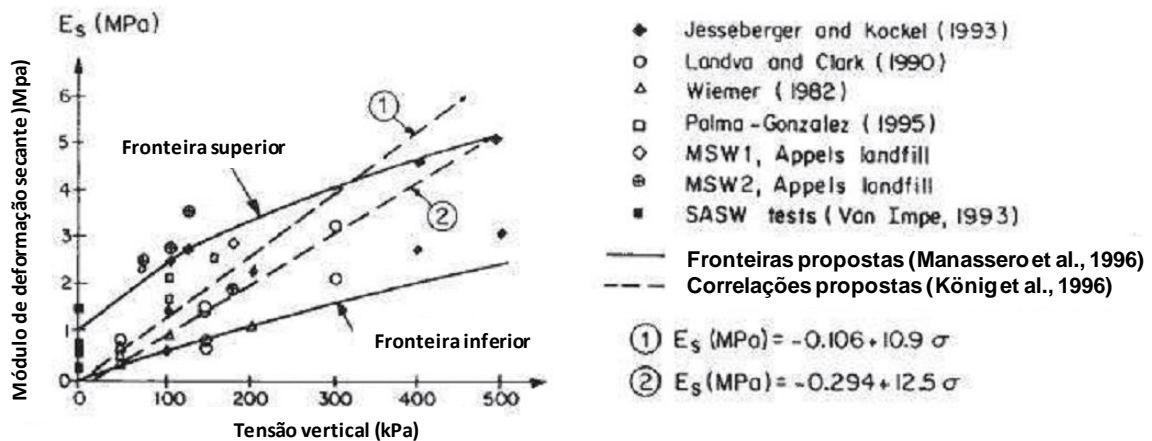


Figura 3.21 - Módulos de elasticidade de RSU (MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996)

Pontes Filho; Santos e Jucá (1998) realizaram ensaios de placa com ciclos de carregamento e descarregamento no aterro da Muribeca em Recife (Pernambuco, Brasil), no intuito de obter dados de resistência ao cisalhamento por comparação entre valores de deslocamentos medidos e obtidos em simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos. Foram realizados 4 ensaios de placa, um deles executado diretamente sobre os resíduos, ou seja, com a remoção da camada de cobertura de solo, e os outros três sobre a camada de cobertura. Adotou-se um modelo elasto-plástico para o comportamento reológico dos resíduos. O módulo de elasticidade, calculado pela fórmula de Schleicher (1926), resultou 1643 kPa. Para a camada de solo de cobertura os parâmetros adotados foram: $E = 13887 \text{ kPa}$, $c = 23,5 \text{ kPa}$ e $\phi = 25^\circ$. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, baseados em Landva e Clark (1990): $c = 13 \text{ kPa}$ e $\phi = 20^\circ$ a 25° , resultaram em boa aproximação com os valores medidos. Nos ensaios com maior número de ciclos, os resultados das simulações se afastaram mais dos deslocamentos reais do que no caso de apenas um ciclo.

Retomando a pesquisa de Azevedo, Ribeiro e Azevedo (2006) apresentada em 3.4, o módulo de deformabilidade dos RSU calculado por equações elásticas foi em média 355 kPa (Figura 3.22). Este baixo valor pode ser explicado pelo reduzido peso específico do corpo de prova. Por outro lado, ensaios de placa realizados em aterros sanitários com resíduos submetidos a maior compactação resultaram em um módulo

de deformabilidade entre 1 e 6 MPa (SANTOS; JUCÁ; ARAGÃO, 1998), como ilustrado na Figura 3.23.

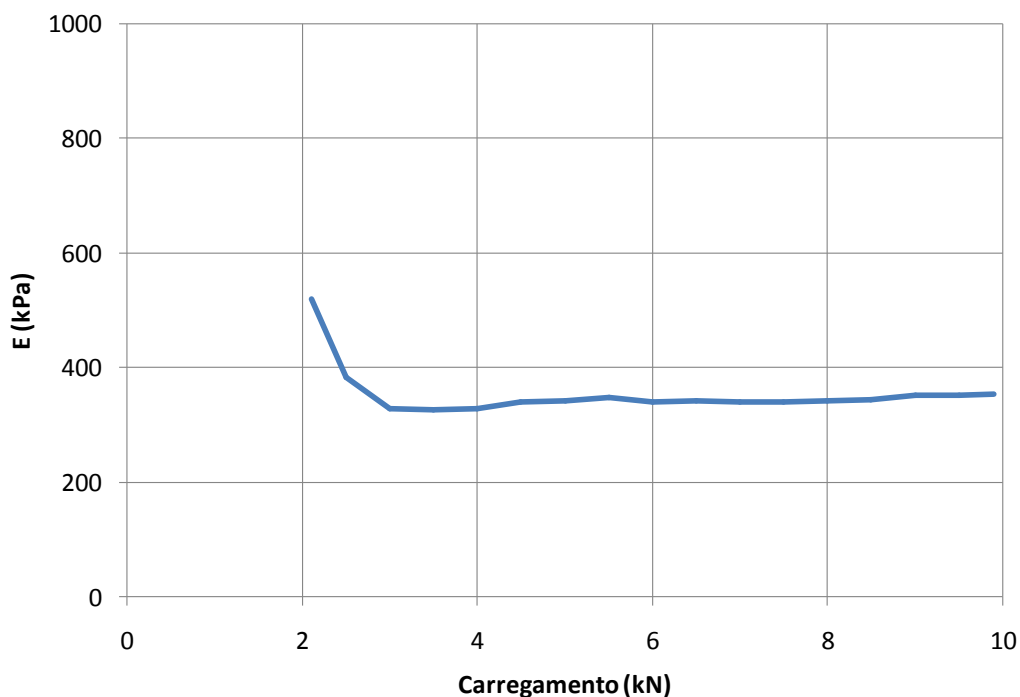


Figura 3.22 - Módulo de deformabilidade de RSU baseado nos ensaios de placa de Azevedo, Ribeiro e Azevedo (2006)

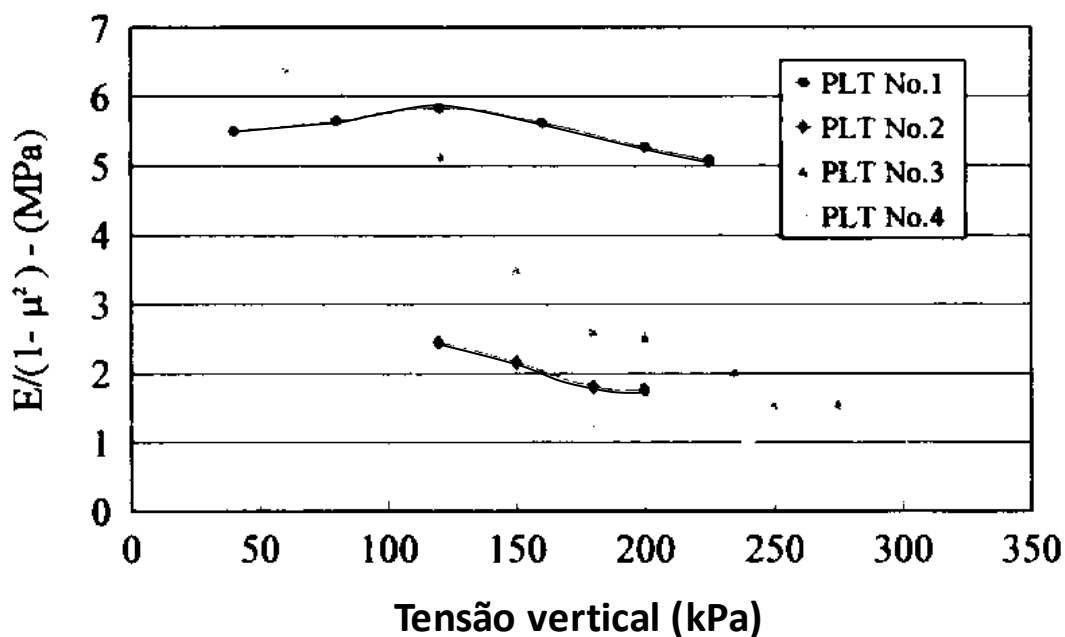


Figura 3.23 - Módulo de deformabilidade de ensaios de placa (SANTOS; JUCÁ; ARAGÃO, 1998)

Azevedo, Ribeiro e Azevedo (2006) observaram dois fatos importantes quanto ao comportamento tensão-deformação dos RSU (Figura 3.24). Os autores apontam que os recalques não se estabilizaram em nenhum dos estágios de carregamento de 24 h. Em segundo lugar, observa-se que a tendência do comportamento tensão-deformação nos primeiros dez estágios de carregamento é substancialmente diferente do comportamento observado para os últimos 7 estágios.

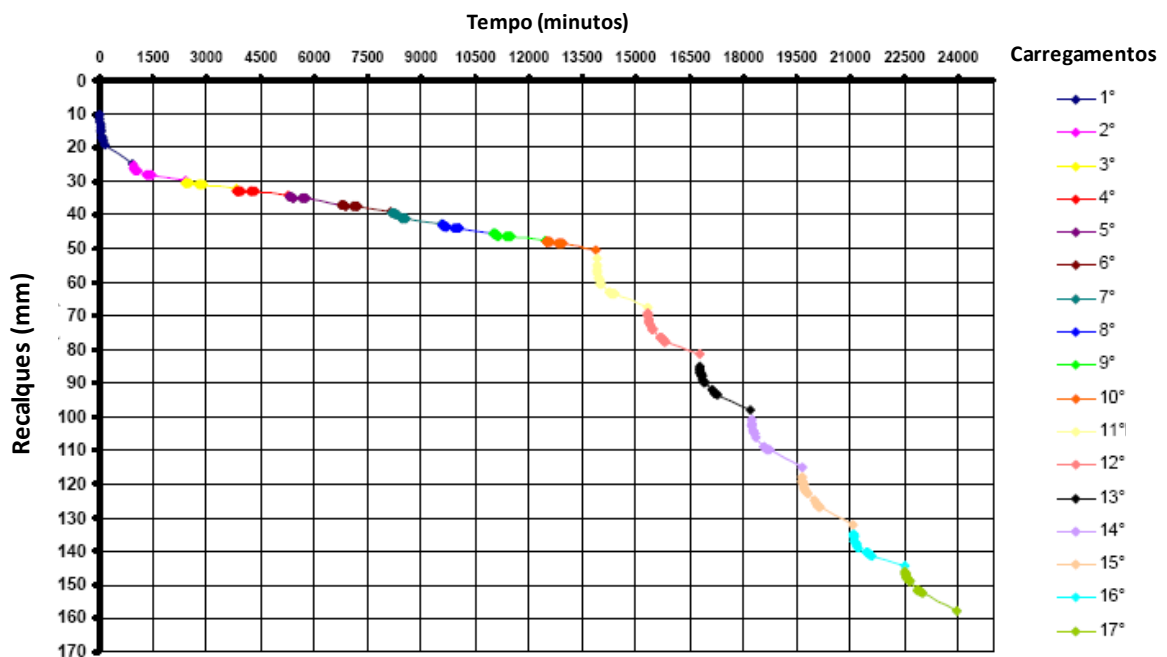


Figura 3.24 - Curva de recalques obtida em ensaio de placa realizado em laboratório (AZEVEDO; RIBEIRO ; AZEVEDO, 2006)

Van Impe et al. (1994) apud Manassero, Van Impe e Bouazza (1996), apresentaram resultados de ensaios de placa realizados *in situ* no aterro sanitário Apples em Derdenmonde (Bélgica). Da mesma forma que apontado por Azevedo, Ribeiro e Azevedo (2006), não houve evidência de uma tensão de ruptura nestes ensaios (Figura 3.25).

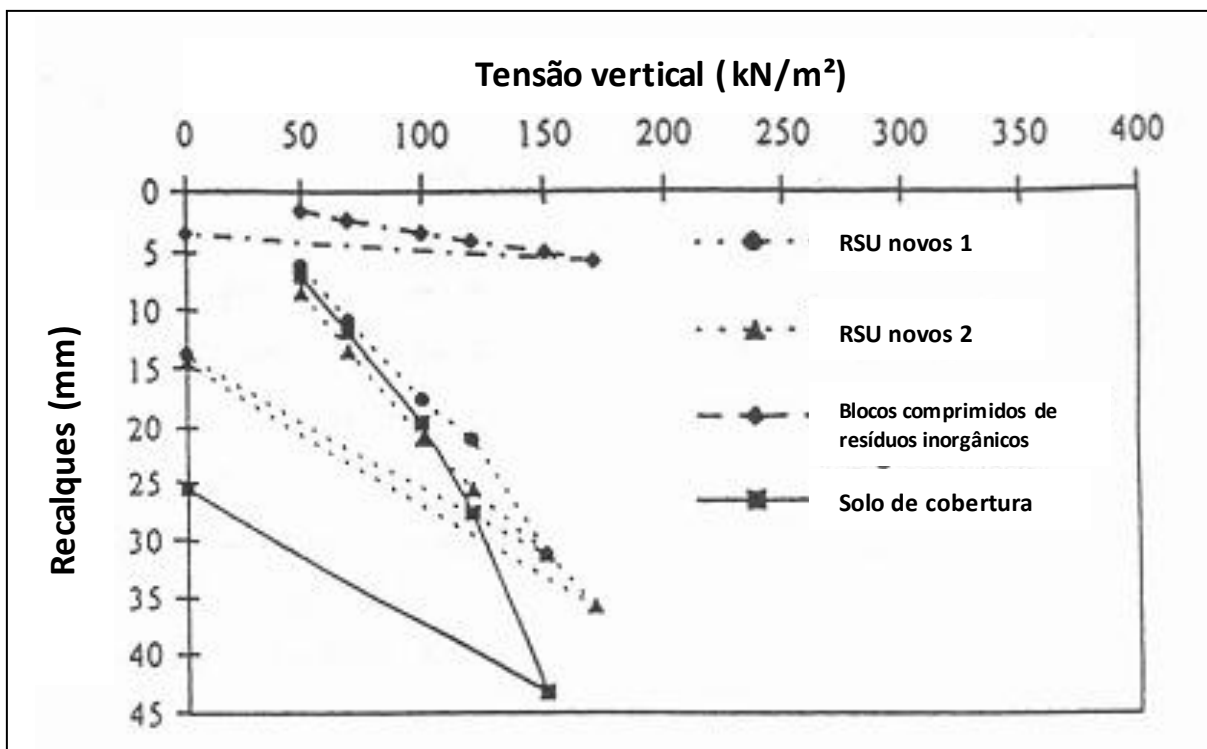


Figura 3.25 -Resultados de ensaios de placa in situ em aterro sanitário (VAN IMPE et al.,1994 apud MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996)

Carvalho (1999), com base em ensaios triaxiais de dimensões superiores (diâmetros de 20 e 35 cm) aos usuais observou um decaimento do módulo de elasticidade em função da deformação axial e um aumento de E em função da tensão confinante (Equação 3.1). Os módulos iniciais variaram de 35 a 40 MPa, valores similares aos obtidos por ensaios *cross-hole*, nos quais $E_{10\%}$ foram inferiores a 4 MPa. Além disso, variando o peso unitário entre 10 e 14 kN/m³, Carvalho (1999) observou que este parâmetro influencia levemente o valor de E, isto é, altos valores de pesos específicos estão relacionados a altos valores de E.

$$E \text{ (MPa)} = 0,068 \sigma_3 \text{ (kPa)} + 9,85, r^2 = 0,998 \quad 3.1$$

Bray et al. (2009) citam seis trabalhos de diferentes autores (JESSBERGER; KOCKEL, 1993; GABR; VALERO, 1995; GRISOLIA et al.,1995; KAVAZANJIAN, 2001; CAICEDO et al., 2002; VILAR; CARVALHO, 2004) que descrevem a

ocorrência de enrijecimento dos RSU conforme aumentam as tensões aplicadas, independentemente da idade e do tipo de ensaio a que são submetidos.

Reddy et al. (2009) realizaram ensaios em amostras trituradas de RSU recém dispostos para estudar seu comportamento geotécnico quanto à compactação, condutividade hidráulica, compressibilidade e resistência ao cisalhamento. Foram utilizados resíduos que em campo apresentavam teor de umidade de 44%. A fração orgânica dos resíduos correspondia de 76 a 88% da massa total. Durante os ensaios, o teor de umidade foi alterado até chegar a 100% e os efeitos nas propriedades geotécnicas devido a este incremento foram estudados. O objetivo deste procedimento foi investigar o efeito da recirculação de líquidos percolados para acelerar o processo de decomposição dos RSU dispostos, modificando o conceito do aterro sanitário seco e bem drenado para o de um biorreator. Não houve indícios de que a saturação da amostra promoveu diferenças significativas no comportamento deformacional dos RSU, como mostra a Figura 3.26.

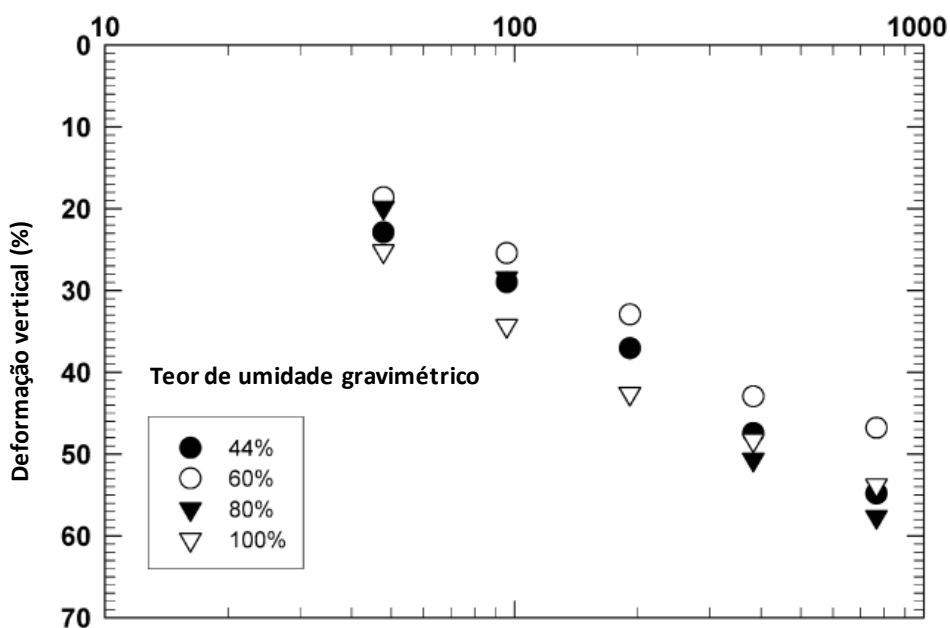


Figura 3.26 - Variação da compressibilidade de RSU novos triturados para diferentes teores de umidade gravimétrica

3.7 Capacidade de carga de sapatas

Quando uma força é aplicada sobre uma área finita na superfície de um terreno, como uma sapata ou uma placa, o solo subjacente, comprimido pela tensão aplicada, pode apresentar dois comportamentos distintos em relação aos deslocamentos. O primeiro comportamento é geralmente relacionado a solos de baixa resistência como argilas moles e areias fofas: o carregamento sobre a placa provoca grande redução volumétrica do solo. O solo muito compressível deforma pouco lateralmente e transfere pequenas solicitações para o restante do maciço afastado da área carregada. A ruptura por punção, associada a grandes deformações, não fica perfeitamente definida e não se desenvolve em todo o maciço; fica restrita às proximidades da aplicação da carga, daí ser denominada ruptura local.

O segundo comportamento, predominante em solos de alta resistência como areias compactas e argilas duras, caracteriza-se pelo fato de que o carregamento provoca mudança de forma, ou seja, a compressão do solo num sentido provoca a expansão no sentido transversal. Praticamente toda a deformação vertical provoca deformações laterais e transmite-se instantaneamente ao restante do maciço, gerando uma ruptura bem definida que atinge não apenas o solo sob a área carregada. Esta é a ruptura geral.

A força ou a tensão que causa a ruptura do maciço devido a uma carga aplicada à superfície em área finita, no caso de fundações diretas, é denominada capacidade de carga. Uma das soluções mais utilizadas para estimar a capacidade de carga de fundações foi desenvolvida por TERZAGHI (1943). Por hipótese, as resistências oferecidas ao peso do solo e à sobrecarga podem ser calculadas independentemente, o que não é estritamente verdadeiro, mas fornece uma solução a favor da segurança (subestima a capacidade de carga). Utilizando cunhas ativas e passivas de Rankine em uma configuração específica de superfícies de ruptura (cunha sob a área carregada se move como corpo rígido, curvas simétricas que reúnem espirais logarítmicas e retas a $45^\circ - \phi/2$ da linha de base da sapata), considerando solo rígido-plástico e representando o equilíbrio de forças verticais atuantes e resistentes na iminência da ruptura, Terzaghi obteve a expressão a seguir para sapatas contínuas (faixa carregada):

$$Q_r = 2 P_p + 2 B c \operatorname{tg} \phi - \gamma B^2 \operatorname{tg} \phi \quad 3.2$$

Onde:

Q_r = capacidade de carga (força que leva à ruptura)

P_p = Empuxo passivo

B = metade da largura da sapata

c = coesão do solo

ϕ = ângulo de atrito interno do solo

γ = peso específico do solo

A solução do problema depende da determinação do empuxo passivo (P_p). Terzaghi adotou três considerações ideais, que acarretaram a concepção dos chamados “fatores de capacidade de carga”. Primeiramente, analisou o problema de determinação de P_p em um solo não coesivo e a base da sapata apoiada sobre a superfície do solo ($c=0$ e $D=0$, sendo D a profundidade da sapata). Depois, considerou o caso em que o solo sob a sapata não tinha peso ($\gamma=0$ e $D=0$). Finalmente, extrapolou o problema para o caso em que o solo não possuía coesão nem peso ($\gamma=0$ e $c=0$) e a capacidade de carga era contrabalaneada pela sobrepressão correspondente ao peso lateral de terra (VARGAS, 1977). Para cada uma das situações, considerou-se P_p em função do respectivo coeficiente de empuxo K_p e substituí-se a expressão de P_p na equação da capacidade de carga, definindo-se os fatores N_γ , N_c e N_q . Para uma sapata circular sobre solo coesivo, pesado e com base apoiada em certa profundidade D , a expressão (3.2) pode ser redefinida por:

$$q_r = 1,3 c N_c + q_0 N_q + 0,3 \gamma B N_\gamma \quad 3.3$$

Onde:

q_r = capacidade de carga (tensão que leva à ruptura)

N_γ , N_c e N_q = fatores de capacidade de carga

$q_0 = \gamma D$

D = profundidade da base da sapata

γ = peso específico do solo

B = diâmetro da sapata

Portanto, a capacidade de carga de uma fundação direta rasa pode ser descrita como a soma de três termos, um dependente da coesão (parcela $1,3cN_c$), outro da sobrecarga (parcela q_0N_q) e o último, relativo ao atrito, do peso específico do solo e da largura da fundação (parcela $0,3\gamma BN_\gamma$).

3.8 Ensaio de placa

O ensaio de carregamento de placa, também denominado prova de carga em placa, é usado na engenharia de fundações para determinar a tensão admissível e o comportamento tensão-deformação na camada de solo sob a placa. Esse ensaio reproduz o comportamento tensão-deformação do solo quando submetido ao carregamento de uma fundação rasa por sapatas (ABMS/ABEF, 1996). Em outras palavras, determina-se a carga que induz uma tensão de cisalhamento igual à resistência ao cisalhamento do solo (VARGAS, 1977).

No Brasil é usual utilizarem-se placas circulares de ferro fundido ou aço de 80 cm de diâmetro; podem também ser utilizadas placas circulares de outros diâmetros ou placas quadradas. Os recalques são lidos a 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos ou até que se estabilizem. O ensaio é executado aplicando-se cargas até a ruptura e a tensão admissível é a adotada como metade da tensão de ruptura.

A NBR 6489 – Prova de carga direta sobre terreno de fundação (ABNT, 1984) padroniza o ensaio em placa, realizado com uma placa de aço de 80 cm de diâmetro carregada em estágios por macaco hidráulico reagindo contra uma cargueira. O critério para mudança de estágio é o término dos recalques do estágio anterior. Procura-se atingir a ruptura; porém, caso não ocorra, paralisa-se o ensaio quando se

atinge o dobro da tensão admissível presumida para o solo ou um recalque considerado excessivo (ABMS/ABEF, 1996).

O relatório de ensaio deve apresentar: descrição do ensaio incluindo local, instalação, montagem do equipamento, data de hora de início e de fim, ocorrências excepcionais, natureza e característica do terreno, curva carga x recalque ou pressão x recalque, com indicações dos tempos de início e fim de cada estágio e respectivos recalques.

Na grande maioria dos casos, a ruptura física não ocorre, devendo-se adotar um critério para a ruptura. Um critério muito usado no mundo todo é considerar como carga de ruptura aquela correspondente a uma deformação de 10% do diâmetro ou do lado da placa. A NBR 6489 considera a tensão admissível a menor entre q_{10} e $\frac{1}{2} q_{25}$, respectivamente, as tensões correspondentes a deslocamentos de 10 mm e 25 mm. A segunda condição é sempre mais crítica que a primeira, segundo observações de Teixeira (1966) e Décourt (1995) apud ABMS/ABEF (1996). A ruptura pode não ser atingida por motivos diversos: local, custos, prazos, insuficiência do sistema de reação, de carregamento ou de leitura.

A distribuição de pressões sob uma placa já foi bastante estudada. Geralmente a região de interesse de espalhamento de tensões compreende a região em que as tensões induzidas no subsolo sejam iguais ou maiores do que 10% da tensão aplicada pela placa ou fundação. Tensões inferiores a 10% são consideradas desprezíveis para os problemas práticos de fundações. Assim, denomina-se bulbo de tensões a região abaixo da base na qual valores significativos de tensões são induzidos no subsolo. O bulbo de tensões atinge geralmente de 1,5 a 2 vezes a largura da área carregada.

Em aterros sanitários, ensaios de placa podem ser realizados com o objetivo de avaliar a capacidade de carga de final de construção do maciço para verificar a possibilidade de um potencial uso futuro que envolva construções. Em outros casos, os ensaios de placa podem ser realizados durante a operação do aterro sanitário para estudar o comportamento mecânico dos RSU (MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Plano de pesquisa

A pesquisa compreendeu a realização de ensaios de placa em aterro sanitário de grande porte em área de disposição recente de RSU para estimar:

- os parâmetros de resistência ao cisalhamento por meio da equação de capacidade de carga de fundações rasas de Terzaghi (1943)
- e o módulo de elasticidade linear, por meio de fórmulas de recalques da teoria da elasticidade para carregamentos superficiais uniformes e de simulação numérica dos ensaios de placa em meio elástico e elasto-plástico.

4.2 O aterro sanitário

Os ensaios de placa foram realizados nas dependências do Centro de Gerenciamento de Resíduos – CGR Itapevi (Figura 4.1), empreendimento da Empresa Estre Ambiental S/A.

O CGR Itapevi localiza-se a cerca de 42 km do centro da cidade de São Paulo e recebe resíduos de oito municípios da porção oeste da Região Metropolitana de São Paulo. Uma das unidades do centro de gerenciamento é um aterro sanitário que opera desde abril de 2003 e é licenciado para receber 1.200 t/dia de resíduos sólidos urbanos em regime de co-disposição com resíduos industriais não perigosos de classes IIA e IIB segundo a classificação da NBR 10.004 (ABNT, 2004).

A área total do empreendimento é de 205.546 m², com 130.0000 m² destinados à construção do maciço de resíduos. A capacidade do aterro sanitário é estimada em 3,2 milhões de toneladas de resíduos domiciliares, comerciais e industriais não perigosos (ESTRE AMBIENTAL, 2004).



Figura 4.1 - Vista geral do CGR Itapevi

4.3 Ensaios de placa

4.3.1 Localização

Foram realizados 15 ensaios de placa no CGR Itapevi, dos quais 5 na porção de disposição mais antiga do maciço (camada 12, região leste) e outras dez na camada mais recentemente constituída (camada 10, região norte), conforme indicado na Figura 4.2 e na Figura 4.4.



Figura 4.2 - Regiões de execução dos ensaios de placa (imagem de satélite obtida por meio do software *Google Earth* - 26.05.2010)

Primeiramente foi realizada uma pré-seleção dos locais nos quais seriam realizados os ensaios, haja vista a necessidade de remover o selo de solo sobre os resíduos; caso a espessura desta cobertura possuísse mais do que 50 cm, a realização do ensaio de placa poderia ficar comprometida, principalmente em virtude de limitações do curso do macaco hidráulico.

Procurando distribuir os pontos de ensaios da maneira mais uniforme possível nas camadas 10 e 12, com o auxílio de uma retroescavadeira foram investigadas dezenas de pontos (Figura 4.3) até serem selecionadas os 15 que apresentavam condições adequadas para realização dos ensaios, isto é, cobertura inferior a 50 cm (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).



Figura 4.3 - Investigação preliminar das regiões aptas para se realizar os ensaios de placa.

4.3.2 Procedimento

Os ensaios foram executados segundo as diretrizes da NBR 6489 (ABNT, 1984), com as devidas adaptações quando necessário em função das particularidades dos RSU.

Os ensaios de placa foram do tipo estático, com pelo menos 5 estágios de carregamento (cada estágio com 20% da tensão máxima prevista igual a 0,6 MPa). As cargas foram aplicadas por conjunto macaco-bomba-manômetro com capacidade para 500 kN, com calibração atualizada, curso do pistão de 350 mm e rótula para garantir a centralização da carga. A instrumentação do ensaio de placa foi constituída por 3 extensômetros mecânicos instalados na face superior da placa, viga de referência para os extensômetros, com 4,0 m de comprimento, nivelamento ótico de precisão para a viga, com referência de nível instalada fora do aterro sanitário (BUREAU DE PROJÉTOS, 2010, 2011).

Figura 4.4 – Localização dos pontos de realização dos ensaios de placa no CGR - Itapevi

INSERIR LOCAÇÃO DOS ENSAIOS NA PLANTA DO ATERRO

FORMATO A3

Para realização do ensaio de placa em cada um dos pontos, foi removida a camada de cobertura de solo, que era em torno de 40 cm (Figura 4.5). Quando os resíduos eram expostos, uma camada fina de areia era aplicada para regularizar a superfície (Figura 4.6). Então, uma placa circular de 80 cm de diâmetro era assentada (Figura 4.7) e o carregamento era aplicado por um macaco hidráulico que reagia contra um caminhão carregado (Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11) com material inerte (rachão ou solo), resultando em uma estrutura para reação que variou entre 20 e 30 toneladas. A opção pelo caminhão carregado como reação ao macaco hidráulico foi adotada em função da impossibilidade de se construir um pórtico sobre o aterro para esta finalidade, uma vez que a baixa resistência do subsolo poderia não suportar os esforços, colocando em risco a integridade dos equipamentos, dos ensaios e, principalmente, da equipe técnica envolvida. As medidas dos recalques foram realizadas por meio de três extensômetros (Figura 4.12 e Figura 4.13).

O critério de estabilização da NBR 6489 (ABNT, 1984) prevê mudança de estágio quando ocorrer variação inferior a 5% entre leituras consecutivas com intervalos de tempo dobrados (a começar de 1 minuto) e 12 horas de permanência na tensão final de ensaio. Como era esperado, não foi possível atender a esse critério de mudança de estágio, uma vez que os recalques dos RSU não estabilizavam nem em 10 horas (ensaio de longa duração realizado no ponto P15). Adotou-se então o critério de 30 minutos como sendo o momento para a mudança de estágio. Assim, foram registradas as leituras dos extensômetros a 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos para cada estágio de carregamento.

Para estudar o desenvolvimento das deformações com o tempo, três testes foram realizados mantendo-se um mesmo carregamento de 6 tf por 6, 8 e 10 horas consecutivas, respectivamente, P14, P11 e P15.



Figura 4.5 - Abertura da cava para realização do ensaio de placa



Figura 4.6 - Regularização da superfície de ensaios com areia



Figura 4.7 - Assentamento da placa de aço



Figura 4.8 – Posicionamento do macaco hidráulico



Figura 4.9 – Montagem do ensaios completa



Figura 4.10 – Caminhão utilizado nos ensaios

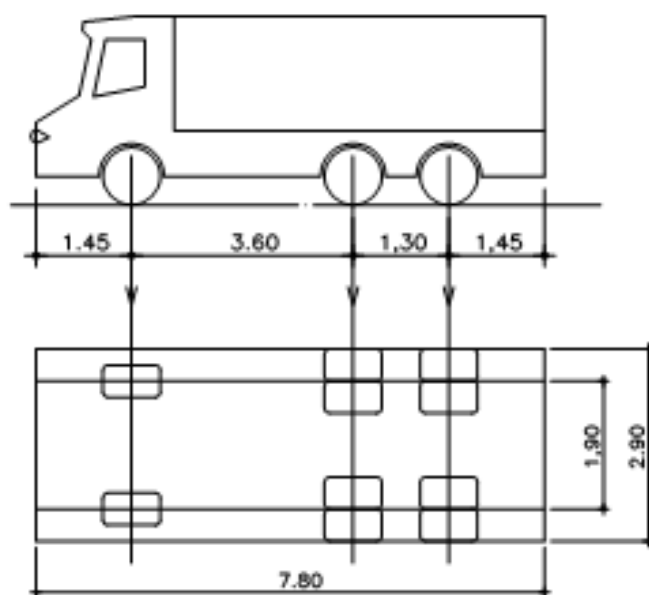


Figura 4.11 - Dimensões do caminhão utilizado como estrutura de reação nos ensaios de placa



Figura 4.12 - Posicionamento dos extensômetros

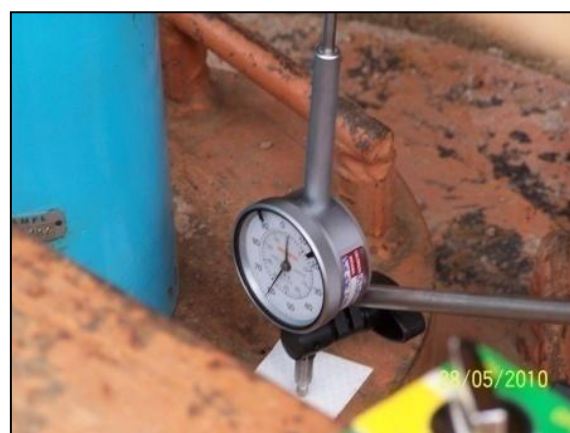


Figura 4.13 – Extensômetro

Em todos os ensaios de placa, a delimitação do estágio máximo de carregamento se deu em função do limite do curso do macaco ou em função das condições de segurança do teste. Devido à heterogeneidade do maciço, a placa não apresentava recalque uniformemente distribuído. Os recalques diferenciais se acentuavam ao longo do ensaio, perdendo-se a eficiência da rótula e ocorrendo uma rotação da placa em relação ao macaco (Figura 4.14). A aplicação de um momento para alinhar a placa invalidaria o ensaio, o qual então era interrompido quando a rotação

apresentasse risco de deslocamento da rótula e queda do caminhão. Assim, alguns ensaios atingiram no máximo o estágio de 12 tf, enquanto outros chegaram a 18 tf.



Figura 4.14 – Efeitos do recalque diferencial da placa no caminhão

4.4 Determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento

Inicialmente as curvas de carga aplicada em função do recalque foram transformadas em curvas tensão-deformação. Adotou-se como recalque final para cada estágio o valor medido após 30 minutos do início da aplicação da carga. A deformação final de cada estágio foi calculada como o recalque médio dos três extensômetros dividido pelo diâmetro da placa.

Conforme exposto no subitem 3.7, utilizou-se a Equação 3.3 de capacidade de carga de sapatas para determinação dos parâmetros de resistência dos RSU:

$$q_r = 1,3 cN_c + q_0 N_q + 0,3 \gamma B N_\gamma$$

Onde:

q_r = carga de ruptura dividida pela área da placa de ensaio

N_γ , N_c e N_q = fatores de capacidade de carga

$q_0 = \gamma D$, tendo-se adotado $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ para o peso específico da camada de solo de cobertura escavada para a realização do ensaio e $D = 0,40 \text{ m}$ para a espessura de solo escavada.

$B = 0,8 \text{ m}$ (diâmetro da placa de ensaio)

Os fatores de capacidade de carga podem ser calculados por Bowles (1995):

$$N_q = \frac{\left(e^{\left(0,75\pi - \frac{\varphi}{2}\right) \text{tg}\varphi} \right)^2}{2 \cos^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)} \quad 4.1$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot g\varphi = \left[\frac{\left(e^{\left(0,75\pi - \frac{\varphi}{2}\right) \text{tg}\varphi} \right)^2}{2 \cos^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)} - 1 \right] \cot g\varphi \quad 4.2$$

$$N_\gamma = \frac{\text{tg}\varphi}{2} \left(\frac{k_{py}}{\cos^2 \varphi} - 1 \right) \approx 2(N_q + 1) \text{tg}\varphi \approx 2 \left[\frac{\left(e^{\left(0,75\pi - \frac{\varphi}{2}\right) \text{tg}\varphi} \right)^2}{2 \cos^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)} + 1 \right] \text{tg}\varphi \quad 4.3$$

Como não foi observada a ruptura propriamente dita nos ensaios realizados, consideraram-se valores de q_r correspondentes a deformações iguais a 2,5%, 5,0%, 7,5%, 10,0%, 12,5% e 15%. Valores de ângulo de atrito de 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30° e 35° foram aplicados à Equação 3.3 a fim de calcular valores de coesão que resultassem em tensões de ruptura o mais próximas possível das tensões aplicadas correspondentes. Portanto, para uma dada deformação, fixando-se o ângulo de atrito, foi determinado o valor de coesão que minimizasse o erro (Equação 4.4).

$$\text{erro} = \frac{\text{tensão medida} - \text{tensão de ruptura calculada}}{\text{tensão medida}}$$

4.4

Encontraram-se assim pares de coesão e ângulo de atrito para diversos níveis de deformação. Contudo, este procedimento foi apenas especulativo e não tem fundamento teórico, porque não ocorreu a plastificação que possibilita a utilização da fórmula de Terzaghi.

4.5 Determinação do módulo de elasticidade

4.5.1 Pela equação derivada da teoria da elasticidade

A distribuição de pressões sob uma placa já foi bastante estudada. Geralmente a região de interesse de espalhamento de tensões compreende a região em que as tensões induzidas no subsolo sejam iguais ou maiores do que 10% da tensão aplicada pela placa ou fundação. Tensões inferiores a 10% são consideradas desprezíveis para os problemas práticos de fundações. Assim, denomina-se bulbo de tensões a região abaixo da base na qual valores significativos de tensões são induzidos no subsolo. O bulbo de tensões sob uma carga uniformemente distribuída em área circular sobre um semi-espaço elástico homogêneo e isotrópico atinge cerca de 2 vezes o diâmetro da área carregada (LAMBE; WHITMAN, 1979).

Entretanto, no caso dos ensaios de placa realizados sobre RSU foi considerado que os efeitos dos carregamentos se estenderiam a até uma vez o diâmetro da placa, uma vez que se espera que o bulbo de tensões seja menos profundo.

Medindo-se o deslocamento do solo em um ou mais pontos dentro do bulbo de tensões da placa, pode-se estimar o módulo de elasticidade, o qual não é uma constante, variando significativamente em função do nível de tensões. Para baixas tensões, contudo, há quase proporcionalidade entre carga e recalque, podendo-se considerar que o solo apresenta comportamento elástico. Nesse caso pode-se estimar o módulo de elasticidade e o coeficiente de reação ou de recalque do subsolo. Para placas circulares rígidas com diâmetro B o módulo de elasticidade pode ser calculado pela Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**:

$$E = \frac{q * B * I (1 - \nu^2)}{s}$$

Onde:

q = tensão aplicada à placa

I = fator de forma

B = dimensão característica (diâmetro para placas circulares, lado para placas quadradas)

ν = coeficiente de Poisson

s = recalque medido

I = $\pi/4$ para placas circulares, aproximadamente 0,84 para placa quadrada (há diversos valores propostos na bibliografia).

O módulo de elasticidade também pode variar com a profundidade. A validade do módulo obtido depende da homogeneidade do solo com a profundidade. Os resultados também são influenciados pela profundidade de escavação para assentamento da placa no terreno.

4.5.2 Por simulação numérica

Obteve-se o módulo de elasticidade E para cada ensaio de placa por retroanálise, modelando o ensaio de placa no *software* SIGMA/W do pacote GeoStudio 2007 da Geo-Slope International Ltd. O SIGMA/W é um *software* de elementos finitos para modelagem de problemas do tipo tensão x deformação (GEO-SLOPE, 2009).

No SIGMA/W, criam-se regiões geométricas, as quais são associadas a materiais previamente definidos. Tais materiais podem ser especificados segundo diversos modelos reológicos, sendo que, no caso dos ensaios de placa consideraram-se 2 materiais: o solo de cobertura e os RSU.

O solo de cobertura foi especificado segundo um modelo elasto-plástico, como é comum se realizar para solos. Os parâmetros adotados para este material foram: o módulo de elasticidade (E), o peso específico (γ_{nat}), o coeficiente de Poisson (ν), a

coesão (c) e o ângulo de atrito interno (ϕ). Os valores destes parâmetros foram selecionados segundo a bibliografia especializada. Adotaram-se valores de 20 kN/m^3 de peso específico, módulo de elasticidade de 20.000 kPa , coeficiente de Poisson de $0,3$, coesão de 20 kPa e ângulo de atrito de 26° . O valor de E foi adotado com base em três fontes (COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO, 1980; CRUZ, 1996; STUERMER, 2006). Este solo de cobertura das camadas parciais do aterro sanitário é aplicado sem controles rigorosos de compactação. Suas principais funções são a regularização da superfície do aterro para que se possa operar as camadas subseqüentes, evitar que as águas pluviais adentrem livremente o maciço e a proteção sanitária.

A espessura de solo de cobertura sobre os resíduos foi padronizada em 40 cm , valor médio observado nos ensaios de placa.

Os RSU foram inicialmente especificados segundo um modelo elástico-linear. Os parâmetros adotados foram: o módulo de elasticidade (E), o peso específico (γ_{nat}) e o coeficiente de Poisson (ν). O modelo elástico linear foi escolhido em função de não ter sido observada tendência de ruptura nos ensaios de placa, tampouco em ensaios de laboratório realizados por outros autores (MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996; VILAR et al., 2006; AZEVEDO et al., 2006), para os níveis de deformação atingidos nos ensaios de placa. Como os ensaios mostraram significativa deformação plástica no estágio de descarregamento, realizaram-se também simulações com os RSU especificados segundo um modelo elasto-plástico, sendo adotados adicionalmente a coesão e o ângulo de atrito.

O valor de peso específico dos RSU foi adotado segundo referências bibliográficas e medições no próprio aterro, e é da ordem de 10 kN/m^3 . Para os valores de ν , utilizou-se um intervalo entre $0,1$ e $0,3$. Segundo Lambe e Whitman (1979), o valor deste parâmetro tem um efeito relativamente pequeno em previsões de engenharia; em estágios iniciais de carregamento em areia, valores típicos encontram-se entre $0,1$ e $0,2$, enquanto sob altas deformações que caracterizam a ruptura, pode ser superior a $0,5$.

Os parâmetros de resistência dos RSU foram adotados para resíduos recém dispostos, de acordo com Ecourbis Ambiental (2007), sendo $c = 19 \text{ kPa}$ e $\phi = 28^\circ$, para todos os pontos da camada 10 do aterro sanitário (P6 a P15) e para o ponto P5

da camada 12. Os resíduos submetidos ao ensaio de placa nos 10 pontos da camada 10 haviam sido dispostos a cerca de 30 dias em média, ao passo que no ponto P5 da camada doze, os registros do aterro sanitário indicam que à ocasião de execução dos ensaios de placa, a disposição dos resíduos havia sido realizada a cerca de três anos.

A Figura 4.15 ilustra a modelagem padrão realizada para os ensaios de placa. O problema axissimétrico foi idealizado com fronteiras a 4 vezes o diâmetro da placa, tanto em profundidade, quanto em distância horizontal. Esta condição é tal que o bulbo de tensões gerado pelo carregamento da placa não atinge as fronteiras do modelo (PONTES FILHO et al, 1998; GEO-SLOPE, 2009).

As condições de contorno aplicadas ao problema foram: a restrição dos movimentos de translação na direção do eixo x nas extremidades verticais e a restrição dos movimentos de translação no plano XY na fronteira inferior.

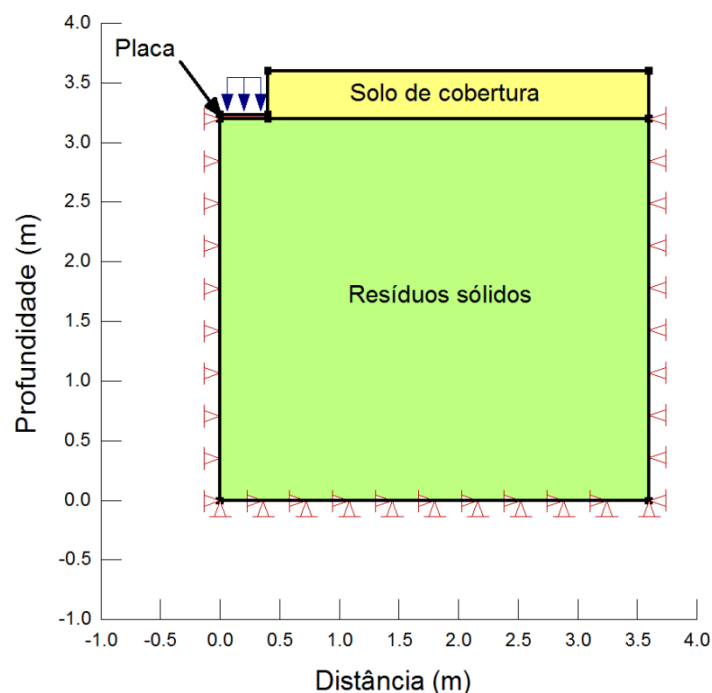


Figura 4.15 - Modelagem do ensaio de placa no SIGMA/W

Inseriu-se no modelo uma placa rígida de 0,80m de diâmetro e 0,03m de espessura em aço com E de 200 GPa, γ de 780 kN/m³ e ν de 0,3 (ATCP 2010). Sobre a placa

foram aplicados os carregamentos externos, conforme uma das opções para condições de contorno do SIGMA/W. Se as tensões externas fossem aplicadas diretamente sobre os resíduos, as deformações superficiais corresponderiam às de um carregamento flexível, o que não corresponde à realidade dos ensaios.

Assim, o módulo de elasticidade (E) foi obtido por tentativas, até que fosse encontrado um valor para o qual os deslocamentos verticais calculados pelo SIGMA/W correspondessem aos valores obtidos nas provas de carga para cada estágio de carregamento.

O SIGMA/W define automaticamente a malha de elementos finitos do problema em função de sua geometria e/ou da escolha do usuário para o formato e as dimensões do elemento finito. No caso da modelagem das provas de carga foi discretizada uma malha de elementos quadrados com 0,1 m de lado (Figura 4.16). No entanto, como a espessura da placa é de apenas 3 cm, nesta região específica do problema o lado dos elementos foi alterado para 0,01 m. A interpolação entre os nós é realizada automaticamente pelo SIGMA/W (Figura 4.17).

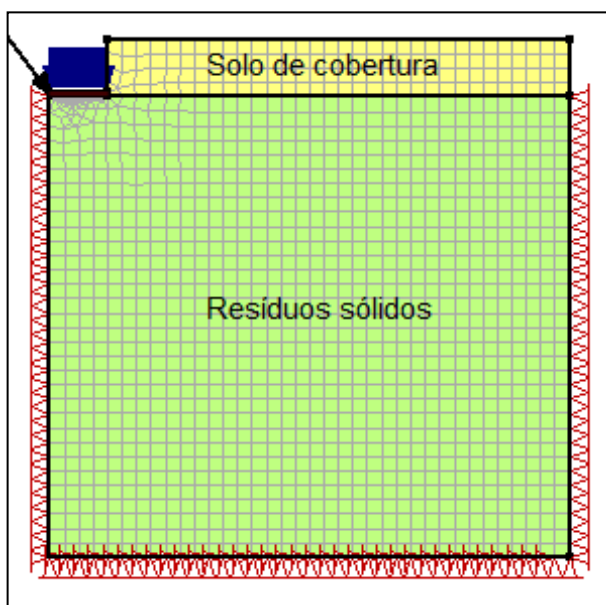


Figura 4.16 - Malha de elementos finitos da modelagem do ensaio de placa

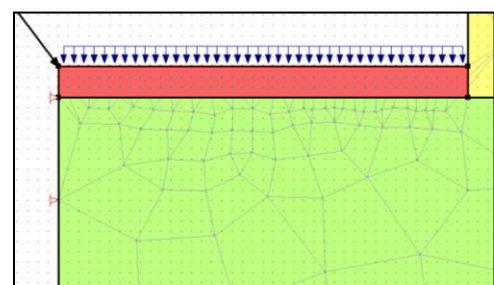


Figura 4.17 - Interpolação entre os nós dos elementos finitos

A seqüência de carregamentos aplicados sobre a placa, ou de tensões aplicadas aos RSU subjacentes, foi a mesma para todos os ensaios.

5 RESULTADOS

5.1 Ensaaios de placa

Foram executados 15 ensaios de placa no CGR Itapevi, sendo que:

- As denominadas P1 a P5 foram executadas na camada 12 leste (resíduos antigos), utilizando o critério de tempo (30 minutos) para mudança do estágio de carregamento;
- As denominadas P6 a P10, P12 e P13 foram executadas na camada 10 norte (resíduos novos), utilizando o critério de tempo (30 minutos) para mudança do estágio de carregamento;
- As denominadas P11, P14 e P15 foram executadas na camada 10 norte (resíduos novos), com carregamento de 6 tf mantido por 8, 6 e 10 horas consecutivas, respectivamente.

A intenção de se realizar ensaios em camadas distintas do aterro era caracterizar o comportamento geomecânico tanto de resíduos novos quanto de resíduos antigos. A região na qual se localiza a camada 12 leste foi onde se deu início as operações do aterro sanitário e os resíduos ali dispostos possuem mais de 3 anos de idade.

Porém, o aterro recebeu no início de sua operação grandes volumes de resíduos industriais (escória de aciaria e areia de fundição). Portanto, em 4 dos 5 ensaios de placa realizadas na camada 12, as deformações foram significativamente menores do que as que ocorreram nos ensaios realizados na camada 10. A mistura de resíduos industriais e resíduos sólidos urbanos resultou em um material menos deformável do que os RSU. O único ponto da camada 12 onde foi possível encontrar a predominância de RSU foi o P5, que teve um comportamento próximo ao dos ensaios executados sobre a camada 10, com deformação na ordem de 16,2%. Onde predominava a presença de resíduos industriais, a deformação máxima ocorreu no P4 e foi da ordem de 5,6%. A menor deformação ocorreu no P2 (1,3%).

Os resultados dos ensaios de placa são geralmente apresentados como curvas de recalques em função do carregamento. A Tabela 5.1 e a Figura 5.1 exemplificam para o ponto P7, respectivamente, a planilha de campo e as curvas de recalque em função do carregamento para os três extensômetros. As tabelas e gráficos correspondentes a todos os ensaios de placa podem ser visualizados no Anexo A.

Tabela 5.1: Exemplo da tabulação dos dados obtidos nos ensaios de placa

Hora	Carga (tf)	Intervalo de Tempo (min)	DESLOCAMENTO VERTICAL								Média (mm)
			Defletometro (R1)		Defletometro (R2)		(R2) (Thiago)	Defletometro (R3)		(R3) (Thiago)	
			Leitura (mm)	Desl. (mm)	Leitura (mm)	Desl. (mm)		Leitura (mm)	Desl. (mm)		
14:04	0,00		49,52	0,00	49,98	0,00	0,00	49,94	0,00	0,00	0,00
14:05	3,00	0:00	40,84	-8,68	41,80	-8,18	-8,18	42,81	-7,13	-7,13	-8,00
14:07	3,00	0:02	40,50	-9,02	41,55	-8,43	-8,43	42,63	-7,31	-7,31	-8,25
14:09	3,00	0:04	39,30	-10,22	41,39	-8,59	-8,59	42,50	-7,44	-7,44	-8,75
14:13	3,00	0:08	38,20	-11,32	40,40	-9,58	-9,58	41,70	-8,24	-8,24	-9,71
14:20	3,00	0:15	37,29	-12,23	39,62	-10,36	-10,36	41,10	-8,84	-8,84	-10,48
14:35	3,00	0:30	36,30	-13,22	38,76	-11,22	-11,22	40,30	-9,64	-9,64	-11,36
14:40	6,00	0:00	14,90	-34,62	19,70	-30,28	-30,28	21,40	-28,54	-28,54	-31,15
14:42	6,00	0:02	9,10	-40,42	15,72	-34,26	-34,26	17,60	-32,34	-32,34	-35,67
14:44	6,00	0:04	8,22	-41,30	14,00	-35,98	-35,98	16,90	-33,04	-33,04	-36,77
14:48	6,00	0:08	7,55	-41,97	13,30	-36,68	-36,68	16,31	-33,63	-33,63	-37,43
14:55	6,00	0:15	7,00	-42,52	12,71	-37,27	-37,27	15,82	-34,12	-34,12	-37,97
15:15	6,00	0:30	6,12	-43,40	11,85	-38,13	-38,13	15,03	-34,91	-34,91	-38,81
15:20	9,00	0:00	30,00	-19,92	31,72	-18,26	-56,31	32,00	-17,94	-52,80	-57,48
15:22	9,00	0:02	28,50	-21,42	30,20	-19,78	-57,83	30,70	-19,24	-54,10	-58,92
15:24	9,00	0:04	27,17	-22,75	28,80	-21,18	-59,23	29,10	-20,84	-55,70	-60,36
15:28	9,00	0:08	26,40	-23,52	28,00	-21,98	-60,03	28,12	-21,82	-56,68	-61,21
15:35	9,00	0:15	25,60	-24,32	27,30	-22,68	-60,73	27,56	-22,38	-57,24	-61,90
15:50	9,00	0:30	22,00	-27,92	23,72	-26,26	-64,31	23,86	-26,08	-60,94	-65,52
15:52	12,00	0:00	12,70	-37,22	14,00	-35,98	-74,03	13,60	-36,34	-71,20	-75,28
15:54	12,00	0:02	11,75	-38,17	13,20	-36,78	-74,83	12,70	-37,24	-72,10	-76,17
15:56	12,00	0:04	10,20	-39,72	12,60	-37,38	-75,43	12,00	-37,94	-72,80	-77,12
16:00	12,00	0:08	9,20	-40,72	11,60	-38,38	-76,43	11,07	-38,87	-73,73	-78,09
16:07	12,00	0:15	8,30	-41,62	10,70	-39,28	-77,33	10,18	-39,76	-74,62	-78,99
16:22	12,00	0:30	7,06	-42,86	9,33	-40,65	-78,70	8,62	-41,32	-76,18	-80,38
16:35	15,00	0:00	16,20	-33,30	17,50	-32,48	-110,20	18,60	-31,34	-107,38	-112,38
16:37	15,00	0:02	15,60	-33,90	16,00	-33,98	-111,70	17,40	-32,54	-108,58	-113,48
16:39	15,00	0:04	10,50	-39,00	11,90	-38,08	-115,80	13,40	-36,54	-112,58	-117,88
16:43	15,00	0:08	8,70	-40,80	9,30	-40,68	-118,40	11,00	-38,94	-114,98	-120,15
16:50	15,00	0:15	4,70	-44,80	6,30	-43,68	-121,40	7,90	-42,04	-118,08	-123,51
17:05	15,00	0:30	3,10	-46,40	4,70	-45,28	-123,00	6,39	-43,55	-119,59	-125,08
17:10	12,00	0:00	2,50	-47,02	4,03	-45,95	-123,67	5,65	-44,29	-120,33	-125,76
17:15	12,00	0:05	2,00	-47,52	3,50	-46,48	-124,20	5,20	-44,74	-120,78	-126,25
17:16	9,00	0:00	1,90	-47,62	3,42	-46,56	-124,28	5,10	-44,84	-120,88	-126,35
17:21	9,00	0:05	1,65	-47,87	3,20	-46,78	-124,50	5,89	-44,05	-120,09	-126,24
17:22	6,00	0:00	2,10	-47,42	3,50	-46,48	-124,20	5,22	-44,72	-120,76	-126,21
17:27	6,00	0:05	2,10	-47,42	3,50	-46,48	-124,20	5,23	-44,71	-120,75	-126,21
17:28	3,00	0:00	10,00	-39,52	10,10	-39,88	-117,60	12,00	-37,94	-113,98	-119,12
17:33	3,00	0:05	10,92	-38,60	11,00	-38,98	-116,70	12,70	-37,24	-113,28	-118,28
17:34	0,00	0:00	36,70	-12,82	35,00	-14,98	-92,70	35,02	-14,92	-90,96	-94,25
17:39	0,00	0:05	42,95	-6,57	39,92	-10,06	-87,78	39,25	-10,69	-86,73	-89,11

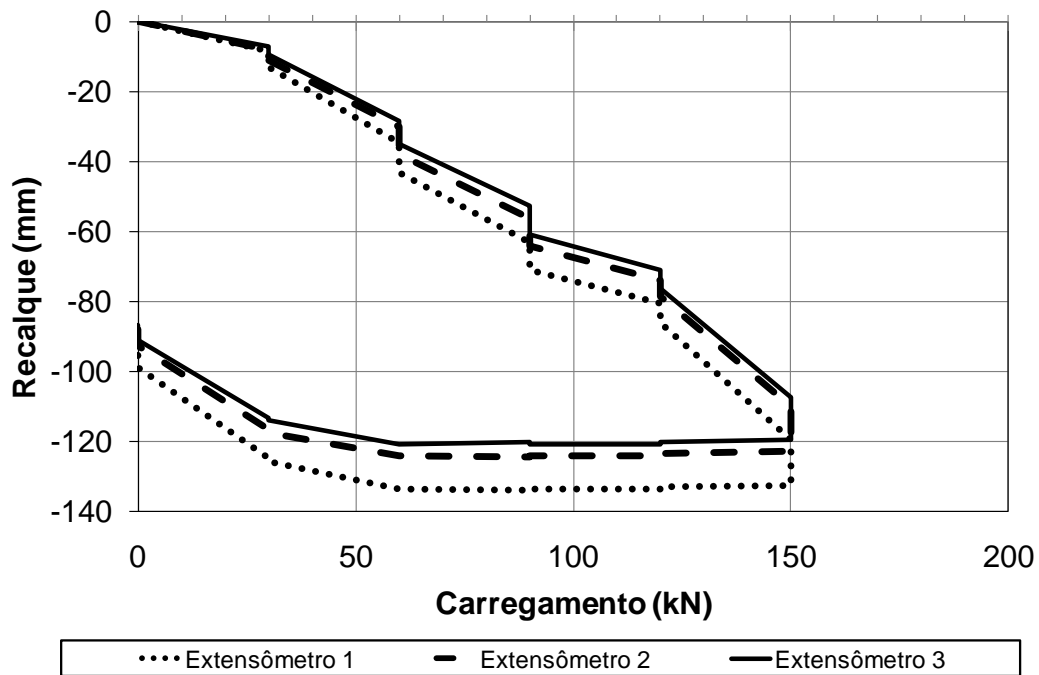


Figura 5.1 - Curva carregamento-recalque para o ponto P7

As curvas carregamento-recalque para todos os ensaios de placa, considerando a média das leituras dos três extensômetros, estão apresentadas nas ilustrações a seguir (Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4).

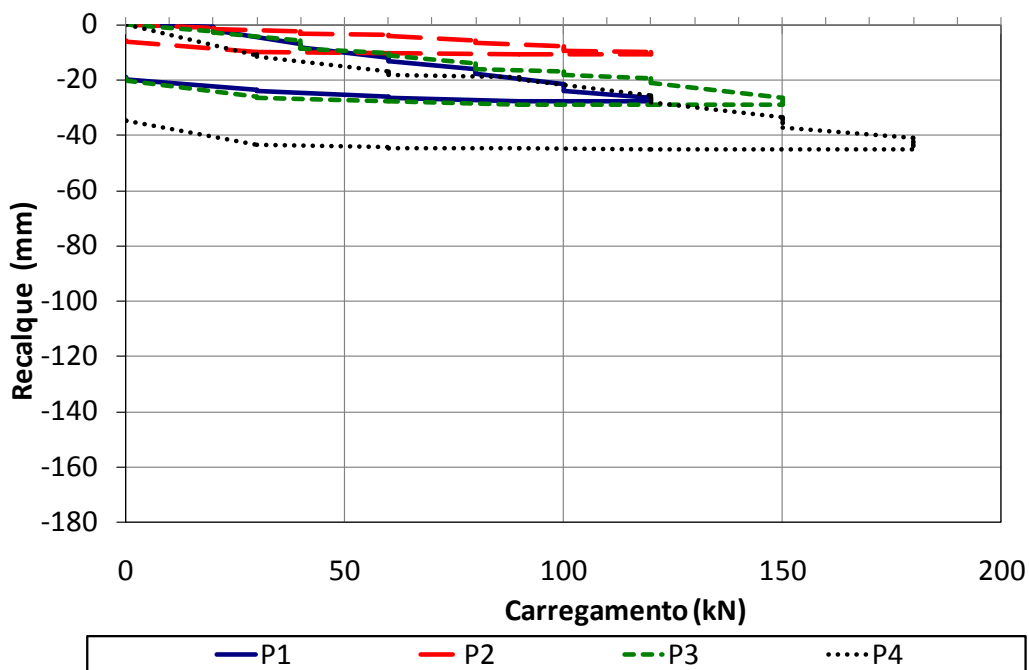


Figura 5.2 - Curvas carregamento-recalque médio para os pontos P1 a P4

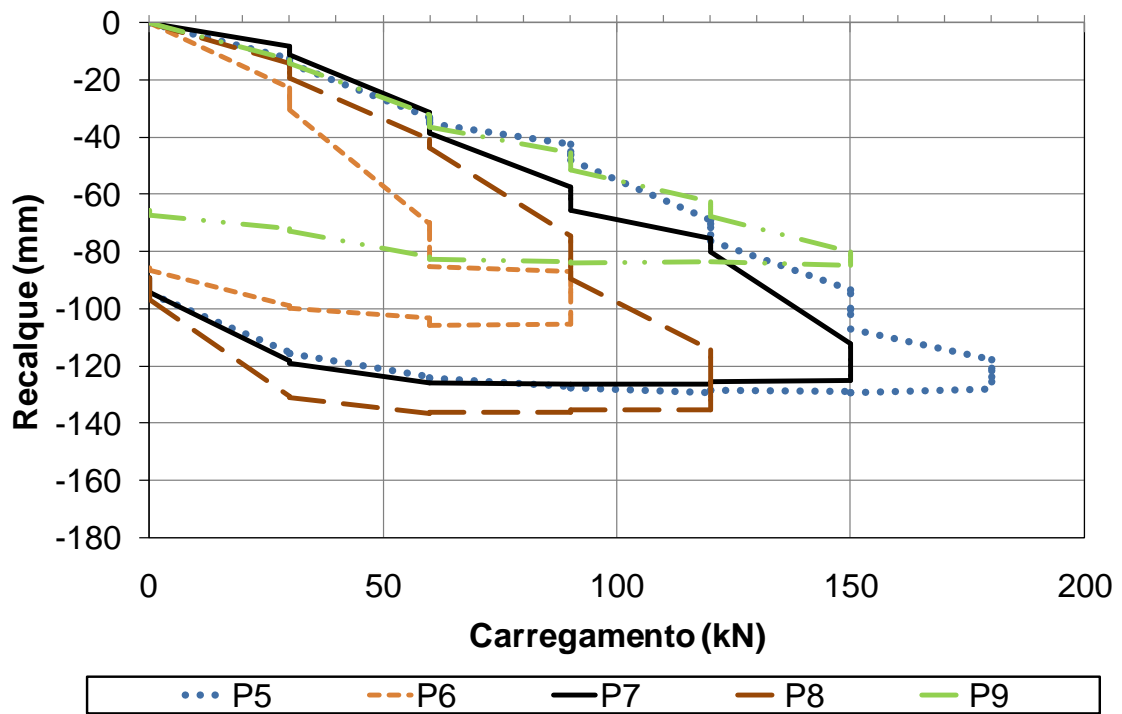


Figura 5.3 - Curvas carregamento-recalque médio para os pontos P5 a P9

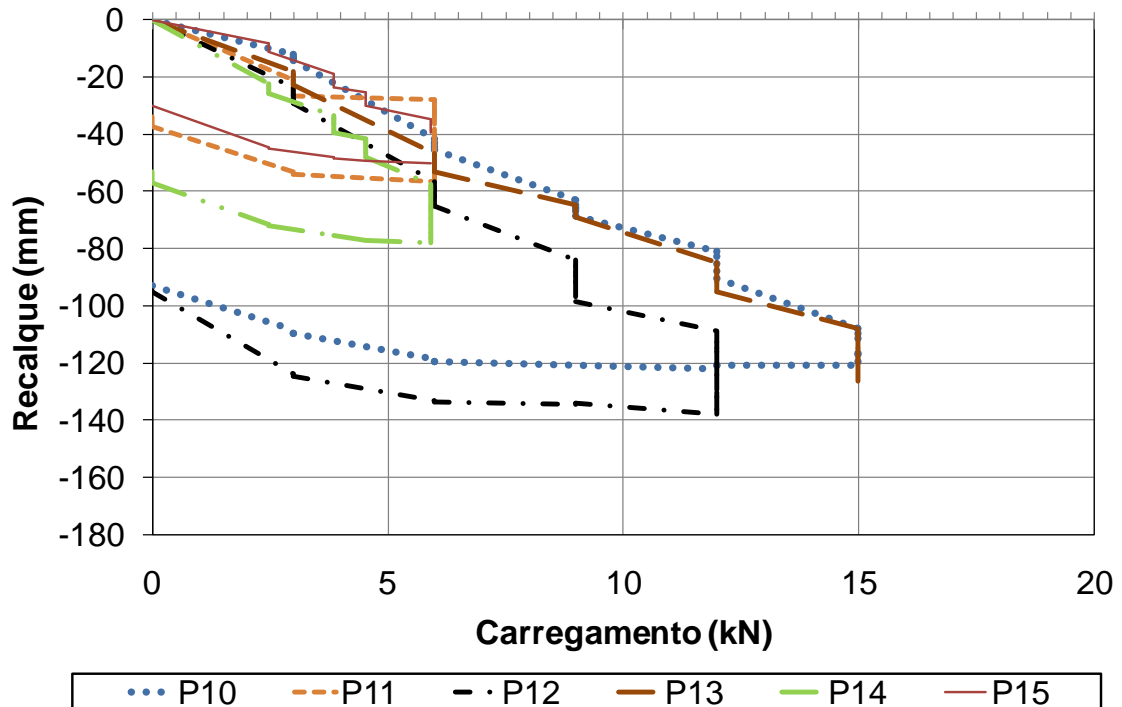


Figura 5.4 - Curvas carregamento-recalque médio para os pontos P10 a P15

Os resultados podem também ser apresentados como curva de tensão em função da deformação, adotando-se como deformação a relação entre a média dos deslocamentos medidos nos três extensômetros e o diâmetro da placa (Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7).

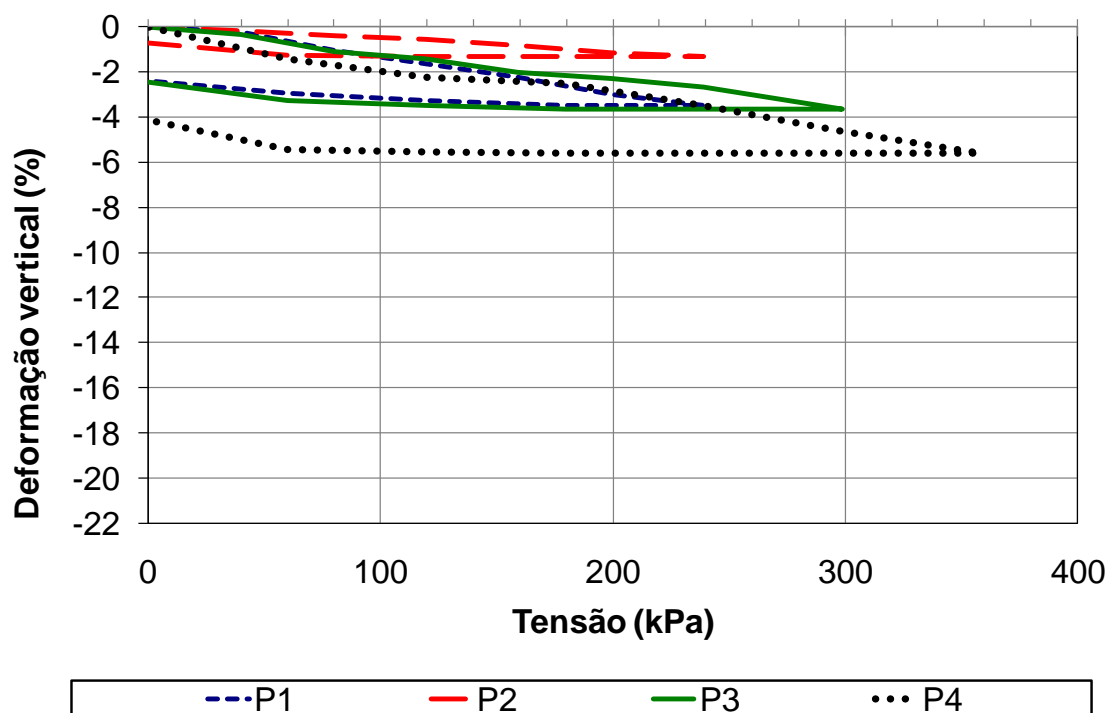


Figura 5.5 - Curvas tensão-deformação para os pontos P1 a P4

Nos ensaios de placa realizados na camada 10, onde a predominância de resíduos domiciliares era notória, as deformações resultaram em valores de 10,6% a 20,0%. Entretanto, a heterogeneidade do material sob a placa influenciou nitidamente no desenvolvimento de alguns ensaios; por exemplo, no P6, P8 e P12, o recalque diferencial tornou o carregamento muito excêntrico, invalidando o modelo proposto para os ensaios de placa e tornando a montagem do ensaio perigosa, de modo que não foi possível atingir os estágios de carregamento finais programados.

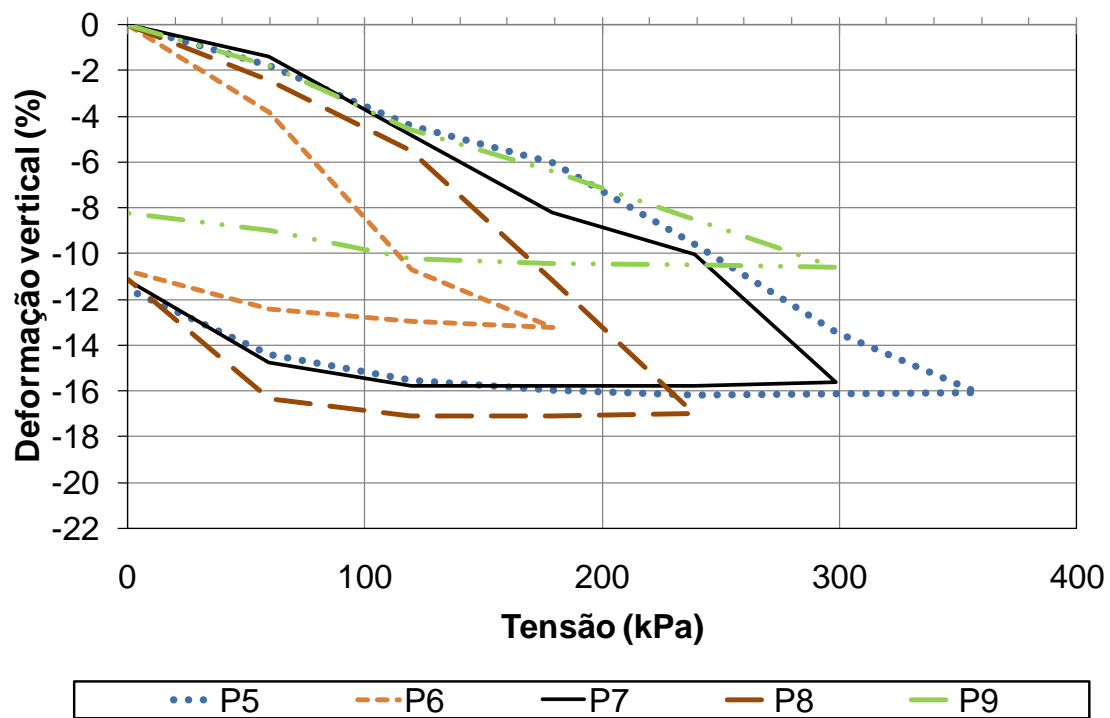


Figura 5.6 - Curvas tensão-deformação para os pontos P5 a P9

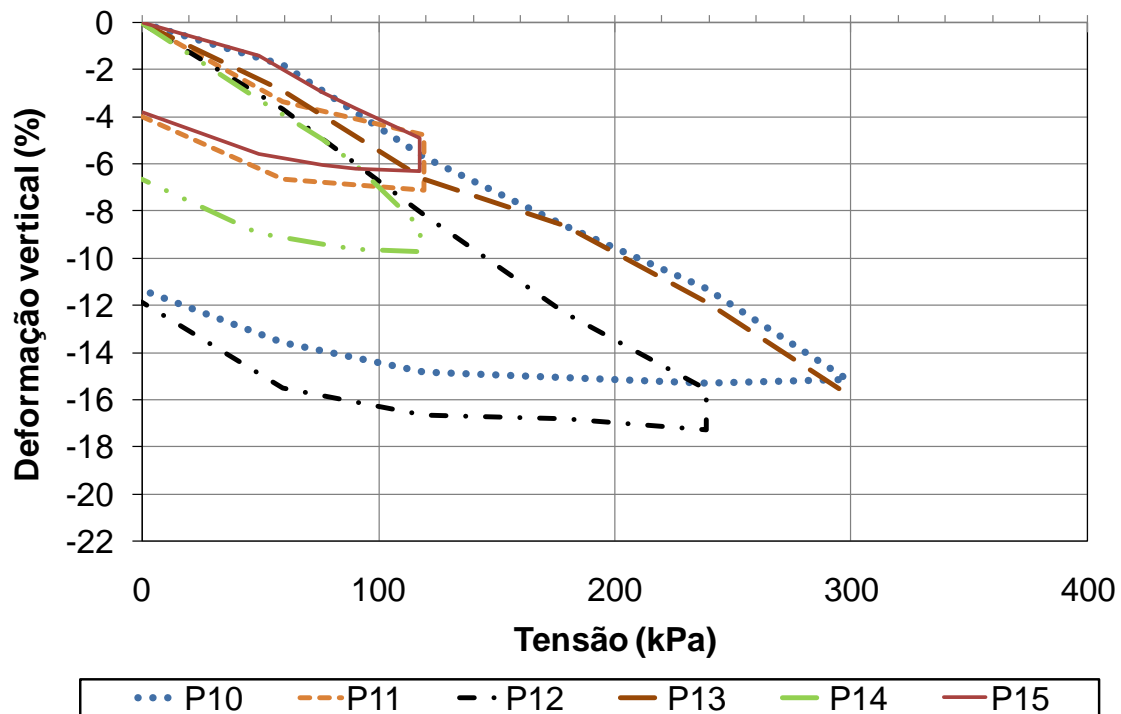


Figura 5.7 - Curvas tensão-deformação para os pontos P10 a P15

Na Figura 5.7 são comparados recalques ao longo do tempo em 8 ensaios de placa para o carregamento de 6 tf, sendo que em um deles, manteve-se este carregamento por 8 horas consecutivas. Verifica-se que as deformações nos RSU não cessam mesmo mantendo-se um estágio de carregamento relativamente baixo por um longo período de tempo, conforme ocorreu para o P11.

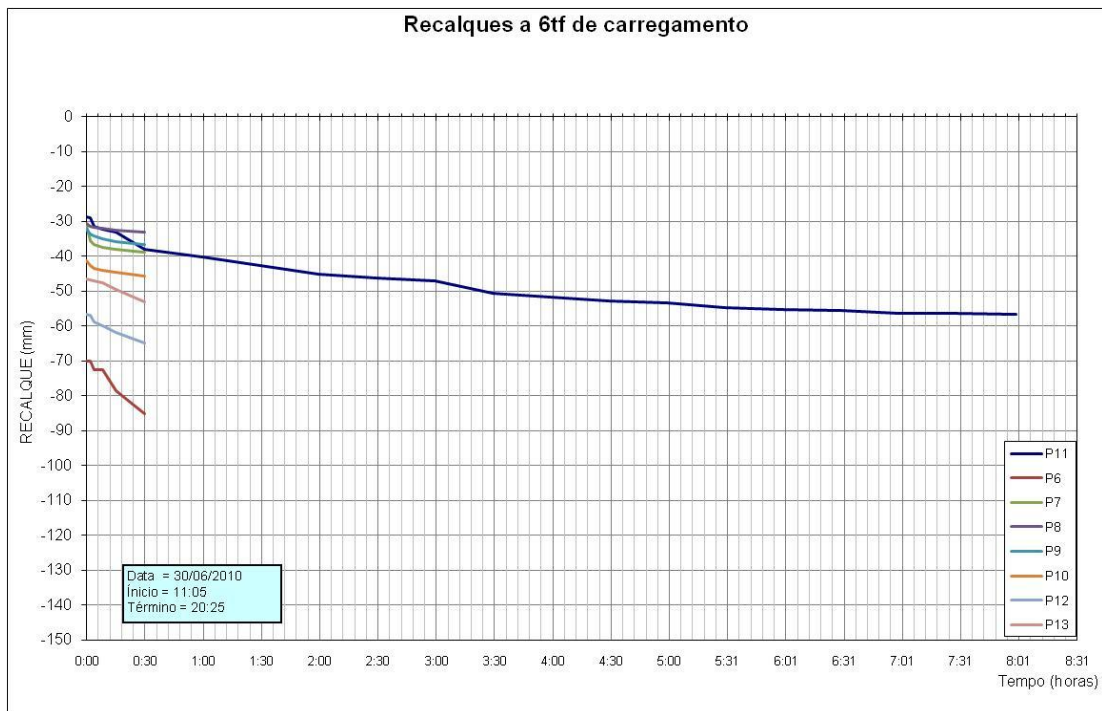


Figura 5.8: Recalques a 6 tf para os ensaios de placa realizadas na camada 10

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 recalçaram 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.

5.2 Determinação de parâmetros de resistência

Lembrando que os resultados são apenas indicativos, uma vez que não ocorreu ruptura, verifica-se que os ensaios de placa induziram a valores de c e ϕ inferiores aos obtidos em retroanálises realizadas a partir de rupturas ocorridas em aterros sanitários brasileiros (Figura 5.9 a Figura 5.11). Isto se deve ao fato da metodologia

utilizada para obtenção destes parâmetros, ou seja, os ensaios de placa, não ter permitido que se alcançassem deformações elevadas, situação em que as rupturas dos aterros sanitários devem ocorrer. A faixa de valores de coesão e ângulo de projeto para aterros sanitários nacionais está também indicada nas figuras.

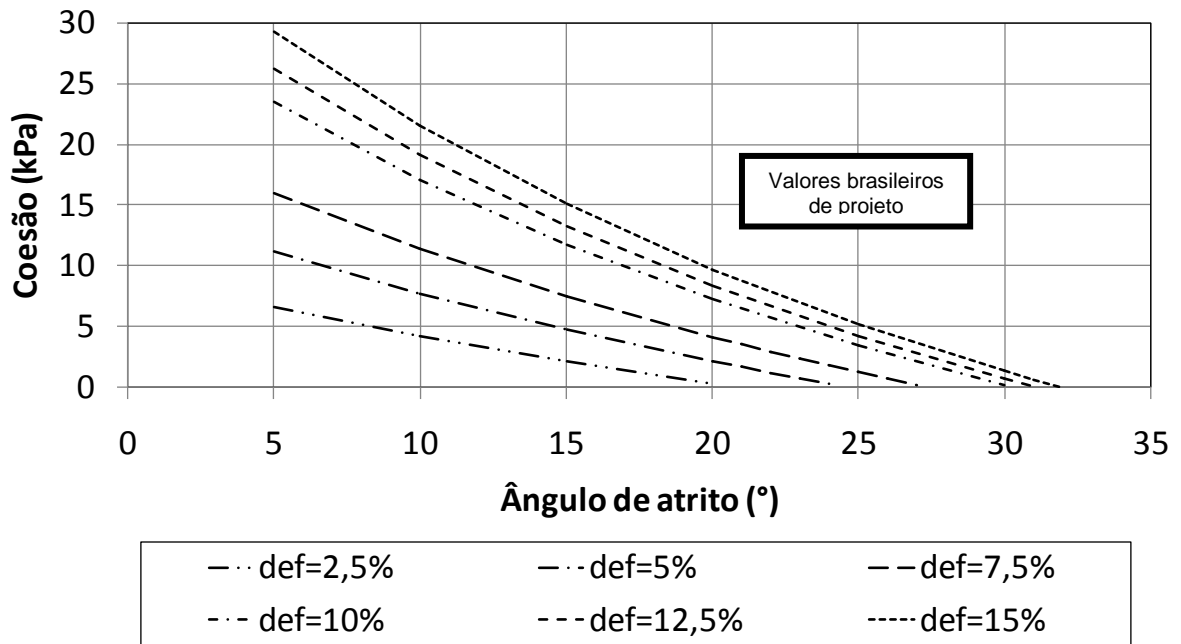


Figura 5.9 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU no ponto P7

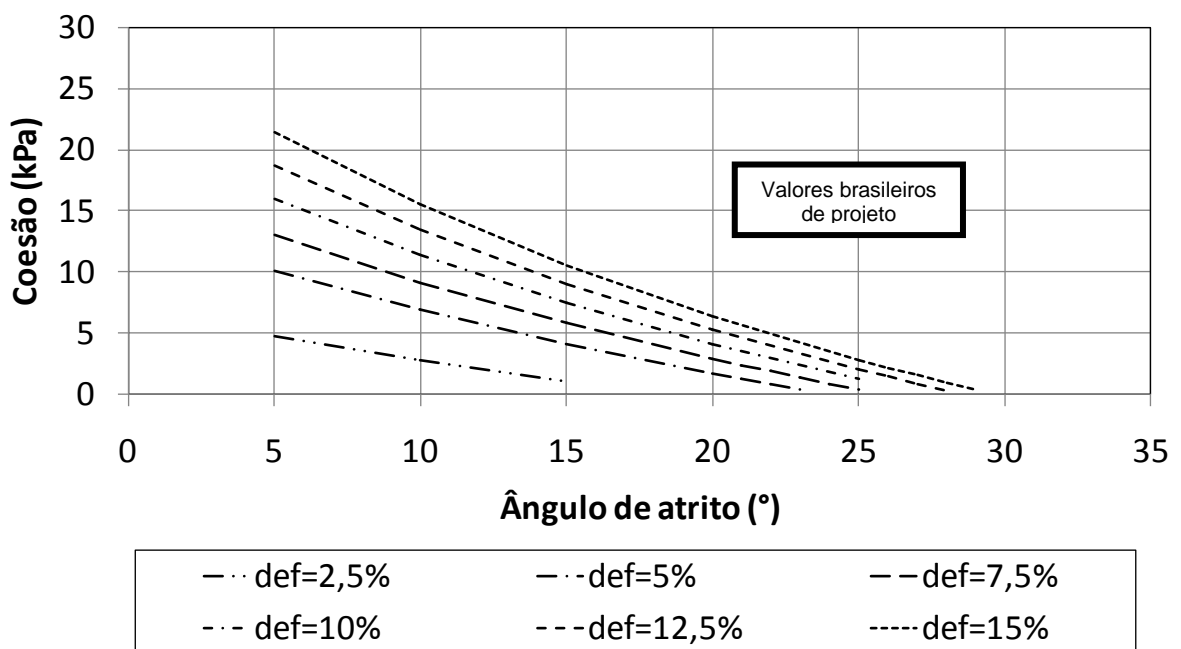


Figura 5.10 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU no ponto P8

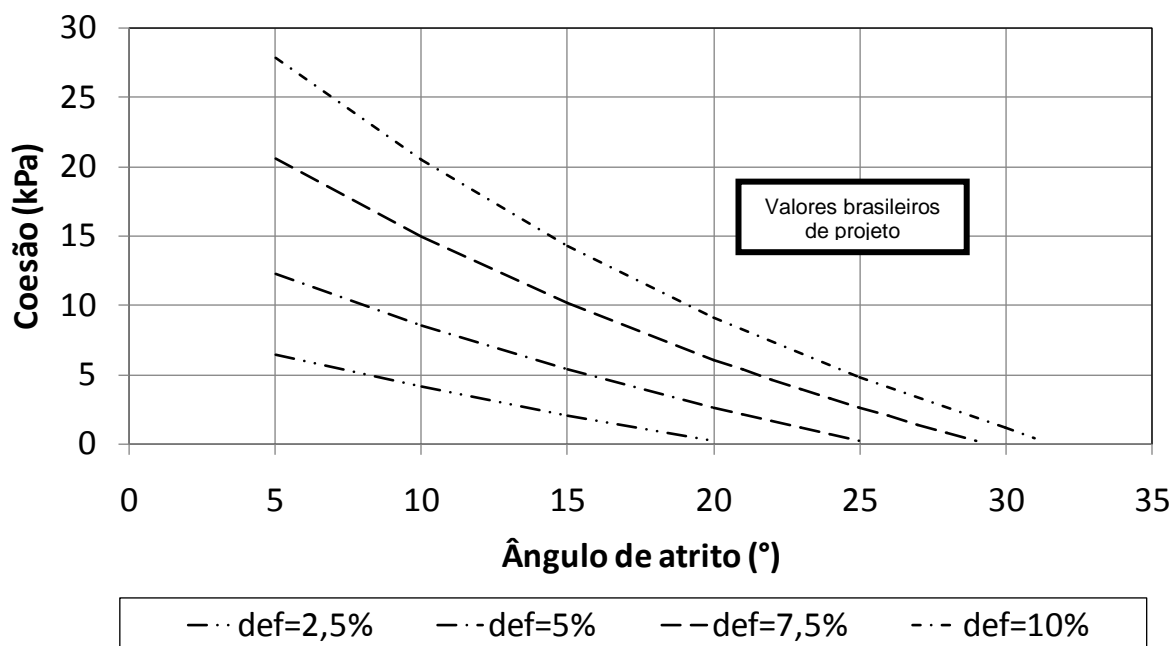


Figura 5.11 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU no ponto P9

5.3 Determinação do módulo de elasticidade E dos RSU

5.3.1 Pela equação derivada de teoria da elasticidade

Aplicou-se a Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** para cada um dos estágios de carregamento dos ensaios de placa, utilizando os deslocamentos finais correspondentes. Assim calculou-se o módulo de elasticidade E para cada estágio de carregamento de cada um dos ensaios realizados (Tabela 5.2, Figura 5.12, Figura 5.13 e Figura 5.14).

Os pontos P1 a P3, localizados sobre resíduos industriais, forneceram módulos de elasticidade entre 6.000 kPa e 18.000 kPa, na ordem de grandeza de módulos de elasticidade de areias fofas angulares (LAMBE; WHITMAN, 1979), o que é coerente com a composição desses resíduos (escórias de aciaria e areias de fundição). O ponto P4, correspondente a uma mistura de resíduos industriais e resíduos sólidos urbanos, apresentou módulo de elasticidade de cerca de 4.000 kPa.

Os ensaios de placa nos demais pontos, localizados sobre RSU, resultaram em módulos de elasticidade variando entre 800 kPa e 3.000 kPa. No caso de solos, esses valores correspondem a argilas moles a muito moles (PINTO, 2000). Os valores obtidos estão coerentes com os da literatura especializada: 500 kPa a 3.000 kPa na compilação de dados de Manassero, Van Impe e Bouazza (1996); 1643 kPa

de Pontes Filho, Santos e Jucá (1998), obtido em ensaios de placa; 1.000 kPa a 6.000 kPa de Santos, Jucá e Aragão (1998), também derivado de ensaios de placa; e 4.000 kPa a 10% de deformação, resultante de ensaios triaxiais realizados por Carvalho (1999).

As curvas de módulo de elasticidade em função da carga aplicada na placa mostram o valor de E relativo ao primeiro estágio sempre maior que os obtidos nos estágios posteriores. Isso ocorre provavelmente pelo efeito do alívio do carregamento sobre os RSU pela retirada do selo de solo. Assim, o primeiro valor de E sofre influência da recompressão dos RSU. Descartando-se os valores de E obtidos nos primeiros estágios dos ensaios de placa, obtém-se uma variação de 800 kPa a 2.100 kPa em onze ensaios realizados em pontos distintos, o que pode ser considerada uma variação razoável para um material tão heterogêneo.

Tabela 5.2 - Módulos de elasticidade calculados para cada estágio de carregamento dos 15 ensaios de placa

Ponto	Carga (tf)	E (kPa)	Ponto	Carga (tf)	E (kPa)	Ponto	Carga (tf)	E (kPa)
PC 1*	2	17961	PC 6	3	1125	PC 11	3	1278
	4	8183		6	801		6	1790
	6	7811		9	969			
	8	7640						
	10	7115						
	12	7358						
PC 2*	2	15872	PC 7	3	3004	PC 12	3	1161
	4	13986		6	1758		6	1050
	6	16071		9	1562		9	1038
	8	13921		12	1698		12	1099
	10	12231		15	1363			
	12	12938						
PC 3*	2	8203	PC 8	3	1766	PC 13	3	1497
	4	5361		6	1553		6	1284
	6	6051		9	1145		9	1483
	8	5622		12	1007		12	1437
	10	6258					15	1351
	12	6423						
PC 4**	3	2969	PC 9	3	2408	PC 14	2,48	1166
	6	3773		6	1862		3,84	1192
	9	5141		9	1996		4,53	1153
	12	4850		12	2012		5,9	1029
	15	4595		15	2012			
	18	4555						
PC 5	3	2376	PC 10	3	2378	PC 15	2,48	2530
	6	1936		6	1494		3,84	1856
	9	2135		9	1491		4,53	1773
	12	1784		12	1512		5,9	1729
	15	1593		15	1411			
	18	1597						

* Resíduos industriais, **RSU e Resíduos industriais

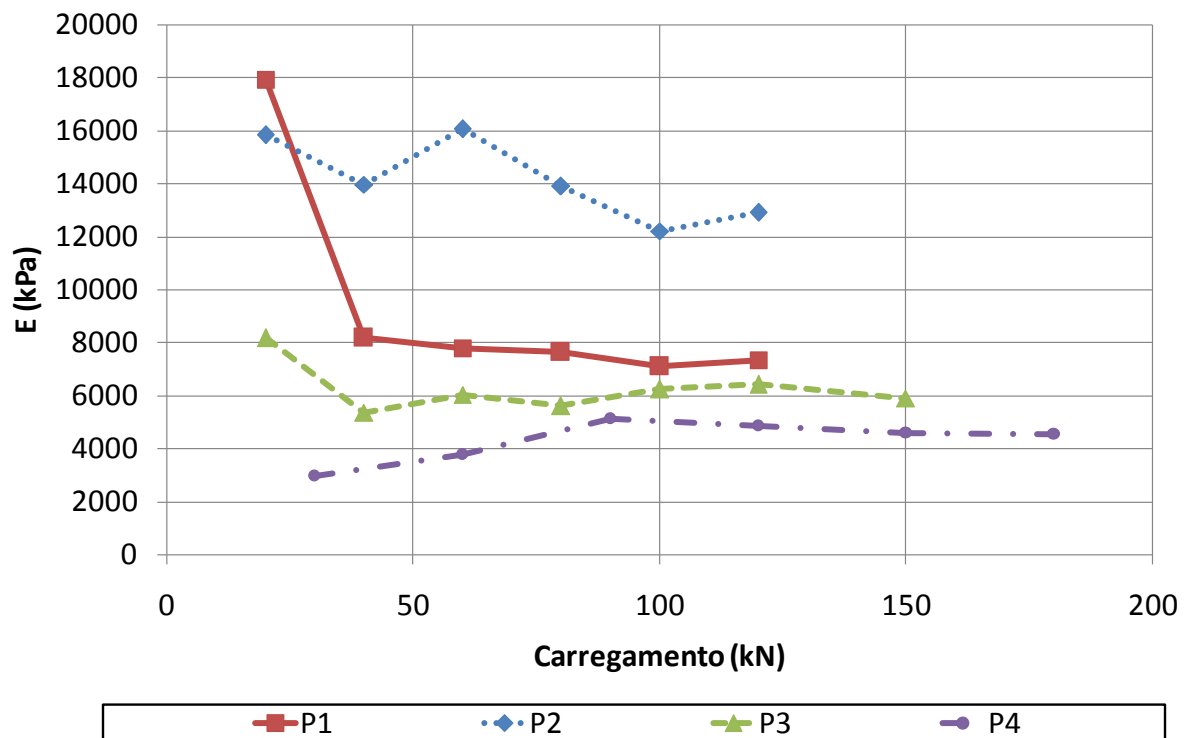


Figura 5.12 - Variação do Módulo de elasticidade calculado por equação elástica para os pontos P1 a P4

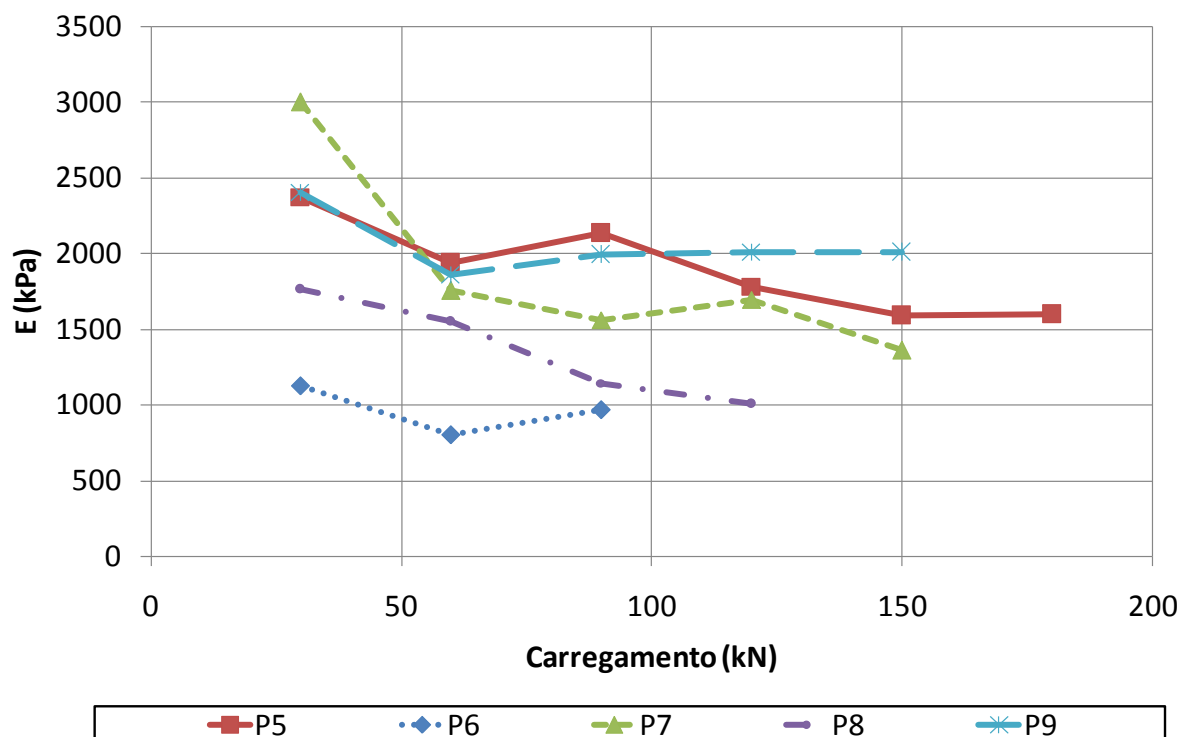


Figura 5.13 - Variação do Módulo de elasticidade calculado por equação elástica para os pontos P5 a P9

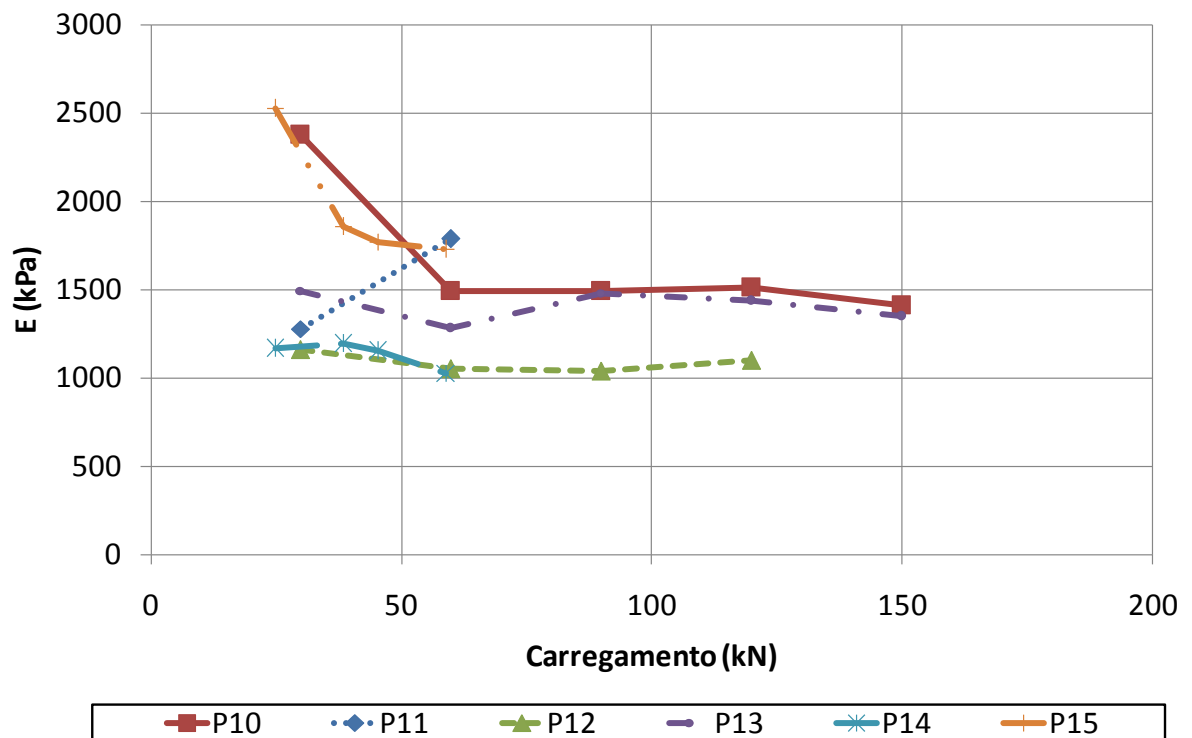


Figura 5.14 - Variação do Módulo de elasticidade calculado por equação elástica para os pontos P10 a P15

Ao contrário do que comentado por Carvalho (1999) e por Bray et al. (2009), não se observou enrijecimento dos RSU em decorrência do aumento das tensões aplicadas. A variação observada do módulo de elasticidade em função da carga aplicada não mostra uma tendência definida considerando-se o conjunto dos ensaios e a variação experimental.

5.3.2 Por simulação numérica

Foram realizadas simulações considerando dois comportamentos reológicos distintos para os RSU: elástico-linear e elásto-plástico. O módulo de elasticidade foi determinado por tentativas, utilizando-se como critério de escolha o menor erro entre os dados de campo obtidos nos ensaios de placa e as curvas de deslocamento vertical em função da carga aplicada obtidas pela simulação numérica.

Para os pontos P1 a P4 não foram realizadas as análises com modelo elasto-plástico pela dificuldade de estimar parâmetros de resistência ao cisalhamento dos

resíduos industriais; as simulações se restringiram ao modelo elástico-linear (Figura 5.15, Figura 5.16, Figura 5.17 e Figura 5.18).

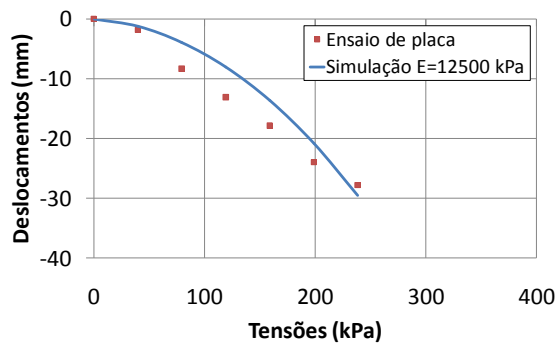


Figura 5.15 – E_{P1} , modelo elástico-linear

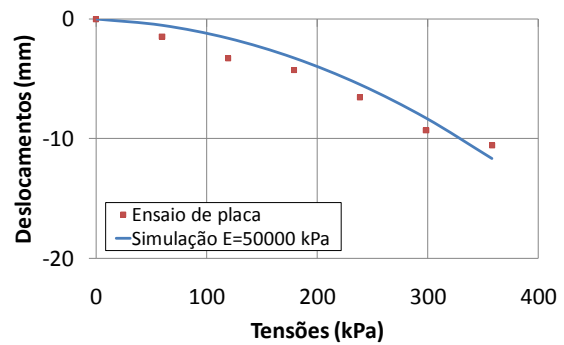


Figura 5.16 - E_{P2} , modelo elástico-linear

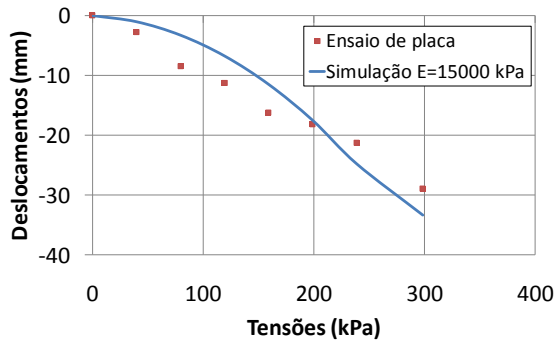


Figura 5.17 – E_{P3} , modelo elástico-linear

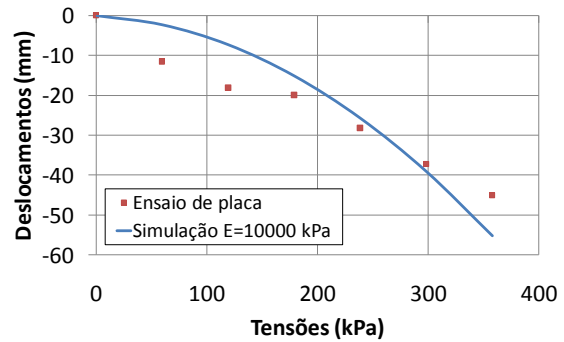


Figura 5.18 - E_{P4} , modelo elástico-linear

O módulo de elasticidade variou de 12.500 kPa a 50.000 kPa para os resíduos industriais, e foi estimado igual a 10.000 kPa para a mistura de resíduos industriais e RSU. Esses valores são muito superiores aos obtidos por fórmulas elásticas, de 6.000 kPa a 18.000 kPa para os resíduos industriais e 4.000 kPa para a mistura de resíduos.

As estimativas de módulo de elasticidade para os pontos P5 a P15, sobre RSU, determinados com a utilização do modelo elástico-linear e do modelo elasto-plástico, estão apresentadas da Figura 5.19 à Figura 5.40 e compiladas na Tabela 5.3.

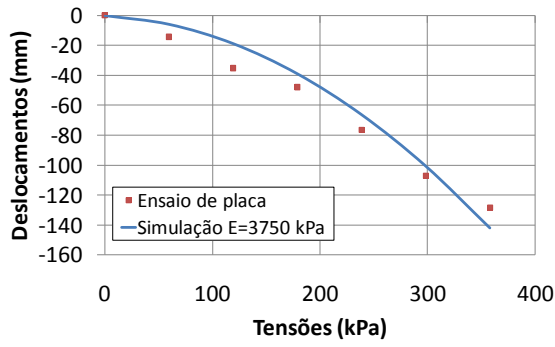


Figura 5.19 – E_{P5} , modelo elástico-linear

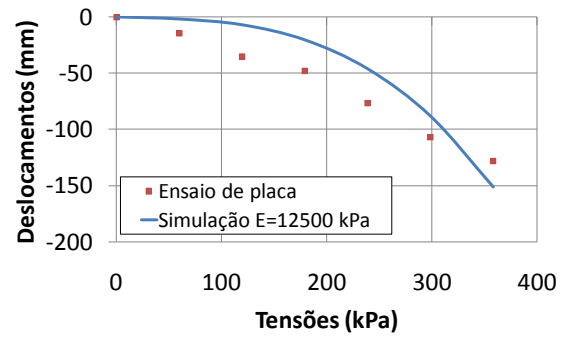


Figura 5.20 - E_{P5} , modelo elasto-plástico

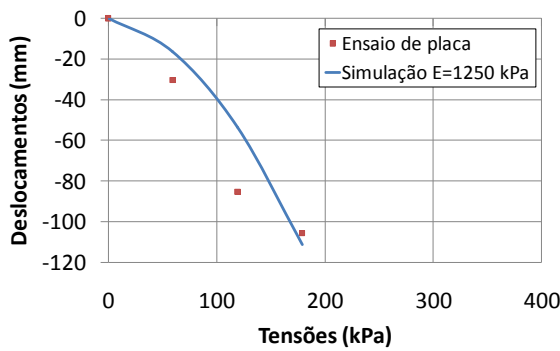


Figura 5.21 – E_{P6} , modelo elástico-linear

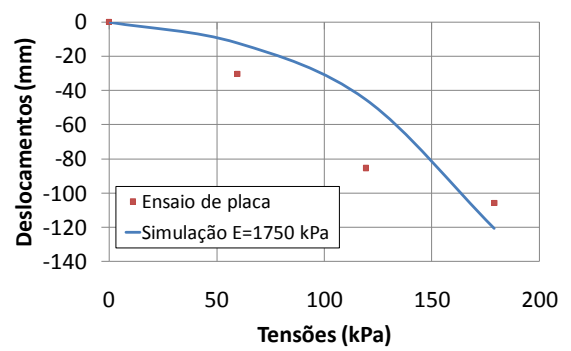


Figura 5.22 - E_{P6} , modelo elasto-plástico

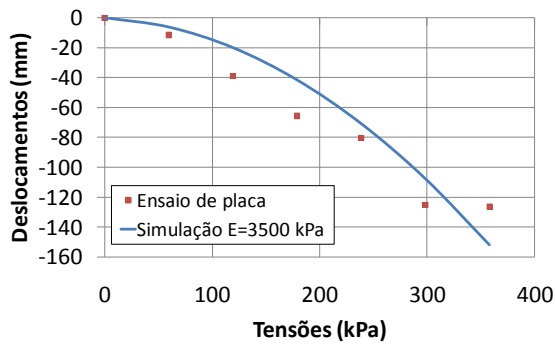


Figura 5.23 – E_{P7} , modelo elástico-linear

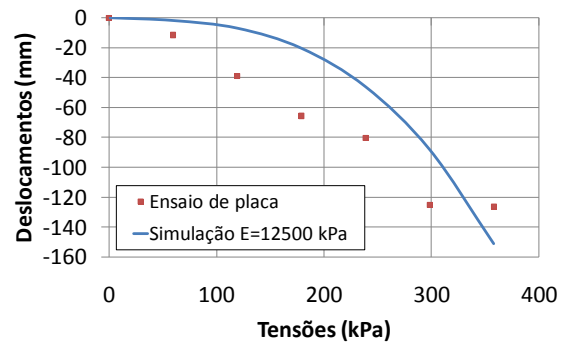


Figura 5.24 - E_{P7} , modelo elasto-plástico

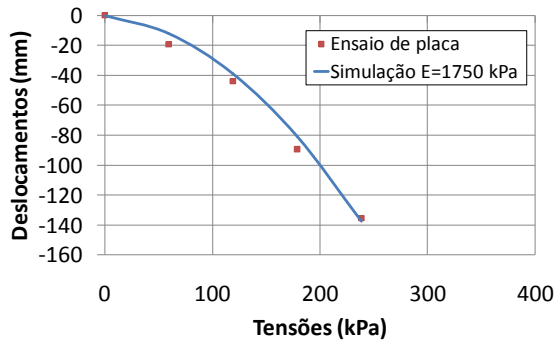


Figura 5.25 – E_{P8} , modelo elástico-linear

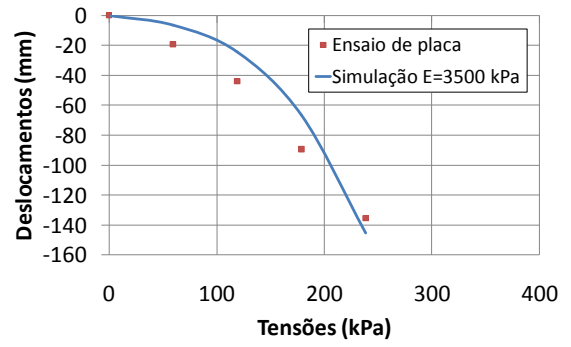


Figura 5.26 - E_{P8} , modelo elasto-plástico

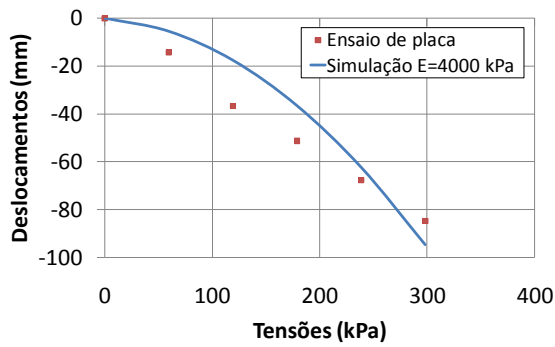


Figura 5.27 – E_{P9} , modelo elástico-linear

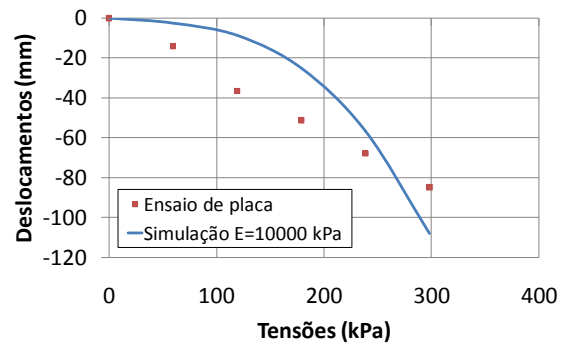


Figura 5.28 - E_{P9} , modelo elasto-plástico

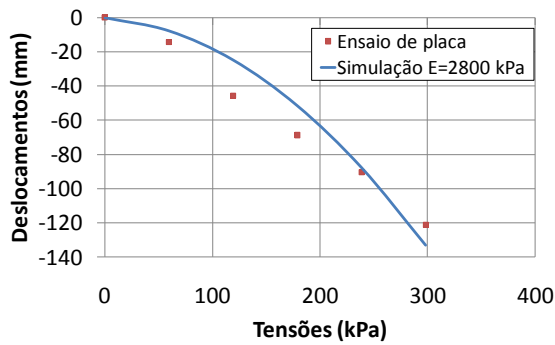


Figura 5.29 – E_{P10} , modelo elástico-linear

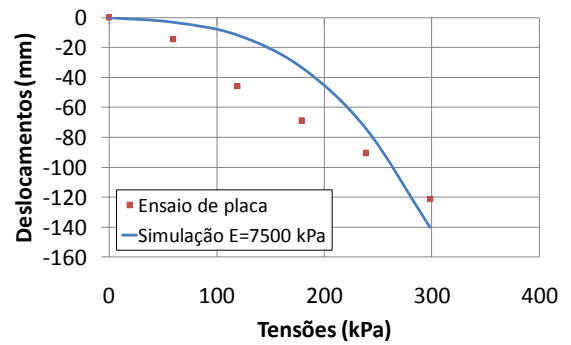


Figura 5.30 - E_{P10} , modelo elasto-plástico

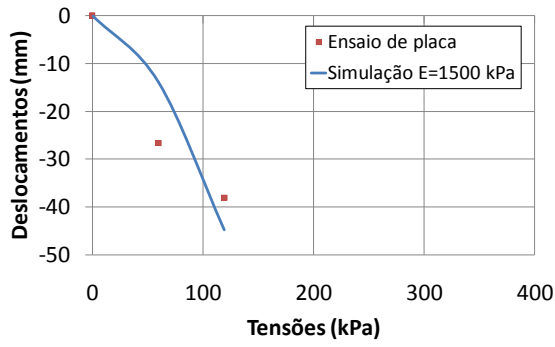


Figura 5.31 – E_{P11} , modelo elástico-linear

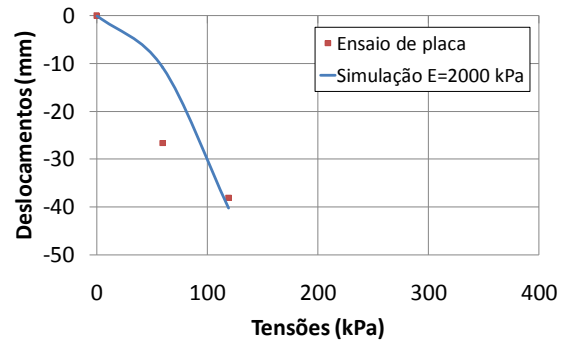


Figura 5.32 - E_{P11} , modelo elasto-plástico

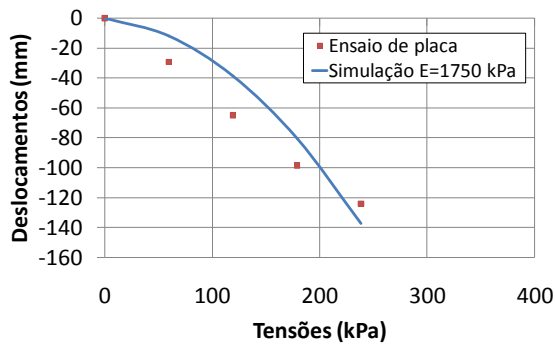


Figura 5.33 – E_{P12} , modelo elástico-linear

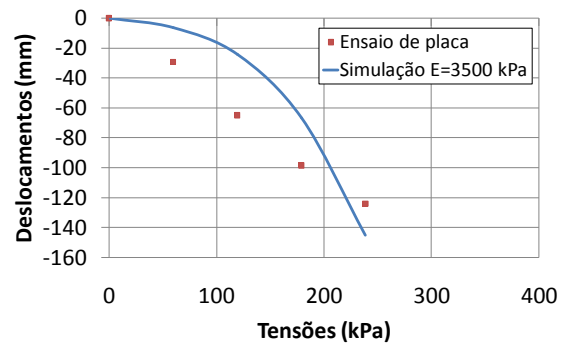


Figura 5.34 - E_{P12} , modelo elasto-plástico

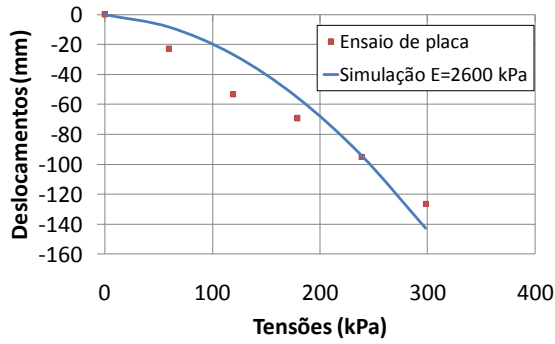


Figura 5.35 – E_{P13} , modelo elástico-linear

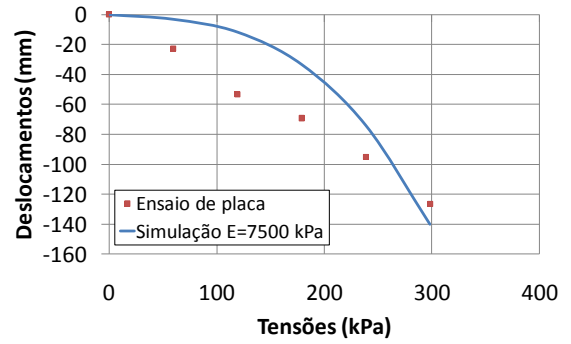


Figura 5.36 - E_{P13} , modelo elasto-plástico

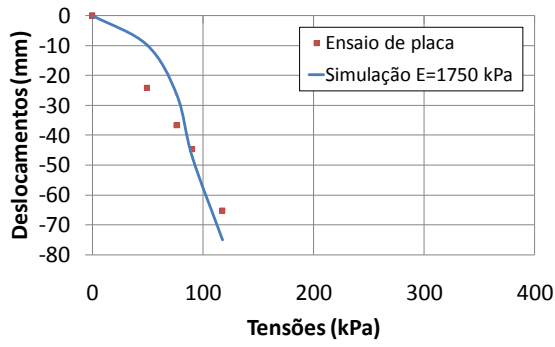


Figura 5.37 – E_{P14} , modelo elástico-linear

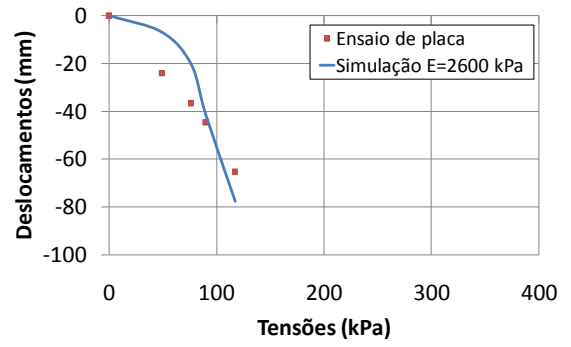


Figura 5.38 - E_{P14} , modelo elasto-plástico

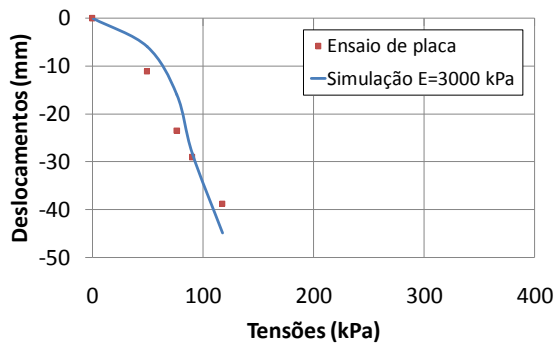


Figura 5.39 – E_{P15} , modelo elástico-linear

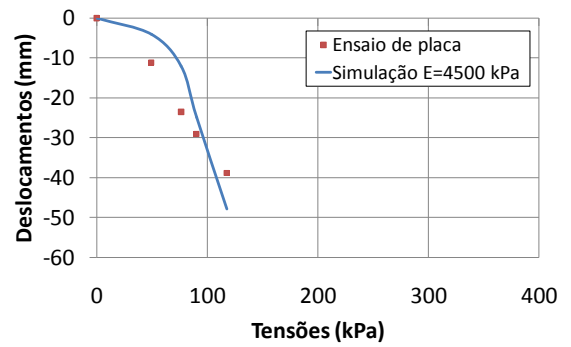


Figura 5.40 - E_{P15} , modelo elasto-plástico

Tabela 5.3 – Módulos de elasticidade obtidos por simulações numéricas e pela equação derivada da Teoria da elasticidade.

	Resíduo	Carregamentos x tempo		Sigma/W Elástico-linear		Sigma/W Elasto-plástico (c=19kPa; $\phi=28^\circ$)		Equação elástica	Equação elástica
		F (tf)	t (min)	E1 (kPa)	ϵ	E2 (kPa)	ϵ	E3 (kPa)	E3, médio (kPa)
PC 1	Industrial	2	30	12500	0,20	--	--	17961	9345
		4	30					8183	
		6	30					7811	
		8	30					7640	
		10	30					7115	
		12	30					7358	
PC 2	Industrial	2	30	30000	0,18	--	--	15872	14170
		4	30					13986	
		6	30					16071	
		8	30					13921	
		10	30					12231	
		12	30					12938	
PC 3	Industrial	2	30	15000	0,22	--	--	8203	6260
		4	30					5361	
		6	30					6051	
		8	30					5622	
		10	30					6258	
		12	30					6423	
		15	30					5906	
PC 4	Industrial/Doméstico	3	30	10000	0,26	--	--	2969	4314
		6	30					3773	
		9	30					5141	
		12	30					4850	
		15	30					4595	
		18	30					4555	
PC 5	Doméstico	3	30	3750	0,14	12500	0,31	2376	1904
		6	30					1936	
		9	30					2135	
		12	30					1784	
		15	30					1593	
		18	30					1597	
PC 6	Doméstico	3	30	1250	0,25	1750	0,33	1125	965
		6	30					801	
		9	30					969	
PC 7	Doméstico	3	30	3500	0,21	12500	0,38	3004	1877
		6	30					1758	
		9	30					1562	
		12	30					1698	
		15	30					1363	

	Resíduo	Carregamentos x tempo		Sigma/W Elástico-linear		Sigma/W Elasto-plástico (c=19kPa; φ=28°)		Equação elástica	Equação elástica
		F (tf)	t (min)	E1 (kPa)	ε	E2 (kPa)	ε	E3 (kPa)	E3, médio (kPa)
PC 8	Doméstico	3	30	1750	0,07	3500	0,2	1766	1368
		6	30					1553	
		9	30					1145	
		12	30					1007	
PC 9	Doméstico	3	30	4000	0,22	10000	0,38	2408	2058
		6	30					1862	
		9	30					1996	
		12	30					2012	
		15	30					2012	
PC 10	Doméstico	3	30	2800	0,18	7500	0,33	2378	1657
		6	30					1494	
		9	30					1491	
		12	30					1512	
		15	30					1411	
PC 11	Doméstico	3	30	1500	0,31	2000	0,35	1278	1534
		6	480					1790	
PC 12	Doméstico	3	30	1750	0,22	3500	0,35	1161	1087
		6	30					1050	
		9	30					1038	
		12	90					1099	
PC 13	Doméstico	3	30	2600	0,20	7500	0,35	1497	1410
		6	30					1284	
		9	30					1483	
		12	30					1437	
		15	30					1351	
PC 14	Doméstico	2,48	120	1750	0,22	2600	0,3	1166	1135
		3,84	120					1192	
		4,53	120					1153	
		5,9	360					1029	
PC 15	Doméstico	2,48	30	3000	0,2	4500	0,3	2530	1972
		3,84	30					1856	
		4,53	30					1773	
		5,9	600					1729	

Segundo o modelo elástico-linear, o módulo de elasticidade variou de 1.250 kPa a 4.000 kPa em todos os ensaios realizados, com erros relativos entre 0,07 e 0,31. A média, 2.514 kPa, e o desvio-padrão, 970 kPa, equivalem aos obtidos pelas fórmulas elásticas.

Segundo o modelo elasto-plástico, o módulo de elasticidade variou de 1.750 kPa a 12.500 kPa em todos os ensaios realizados, com erros relativos entre 0,20 e 0,38. O ajuste precário das simulações aos valores reais resultou em um valor médio de módulo de elasticidade de 7.068 kPa associado a um desvio-padrão de 4.284 kPa.

O coeficiente de variação para este modelo, de 0,60, foi significativamente superior ao relativo ao modelo elástico-linear, de 0,38.

Observa-se que as curvas de deslocamento em função da tensão aplicada obtidas por simulação são não lineares, apresentando uma tendência de menores variações de deslocamento em função da variação da tensão para níveis mais baixos de tensão, e de maiores variações de deslocamento em função da variação da tensão para níveis mais altos de tensão. No entanto, as curvas de deslocamento em função da tensão aplicada obtidas nos ensaios de placa apresentam-se praticamente lineares.

A Figura 5.8 mostrou o significativo efeito do tempo de carregamento nos recalques ocorridos, indicando que modelos visco-elásticos ou visco-elasto-plásticos poderiam melhor representar o comportamento dos RSU do que modelos elásticos. Um dos futuros desdobramentos desta pesquisa será verificar a possibilidade de representar os resultados obtidos por um modelo que englobe a viscosidade.

5.4 Aplicação dos resultados obtidos

Como prosseguimento da pesquisa, pretende-se verificar como se dará o comportamento do maciço sanitário em diversas fases de sua operação, a partir dos resultados obtidos para o módulo de elasticidade e de simulações numéricas com o *software* SIGMA/W. A seção crítica do aterro sanitário modelada no SIGMA/W com base nas plantas de escavação do terreno natural para implantação do aterro e situação final de projeto está apresentada na Figura 5.41.

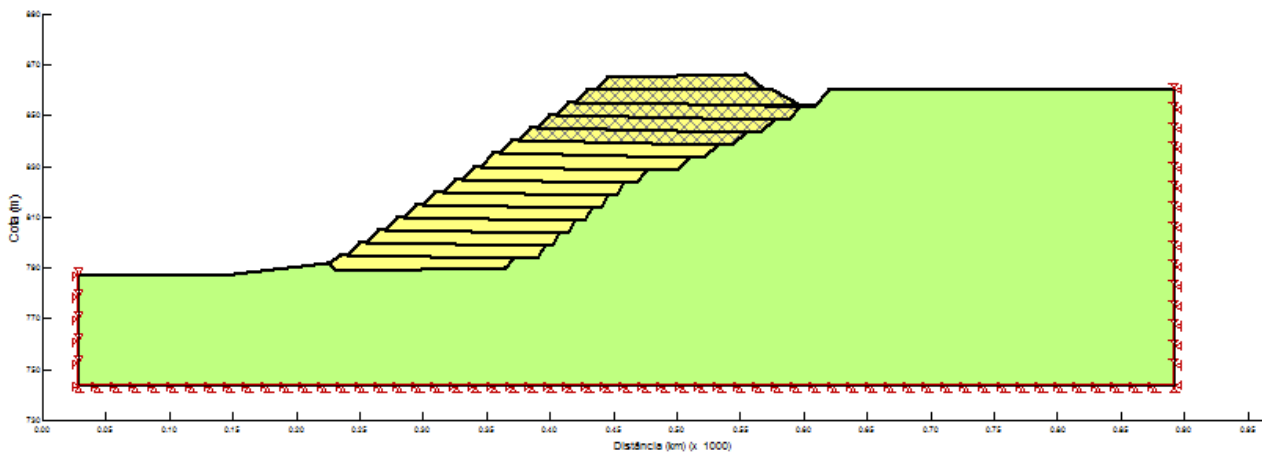


Figura 5.41: Seção crítica do CGR Itapevi na ocasião de seu encerramento

O SIGMA/W permite que sejam consideradas as etapas de execução da obra, sendo possível avaliar o comportamento deformacional do maciço a cada uma dessas etapas (Figura 5.42 a Figura 5.45). Esta ferramenta pode contribuir para futuros projetos de aterros sanitários, quanto à decisão das frentes de serviço a serem mobilizadas em cada etapa de ocupação do empreendimento.

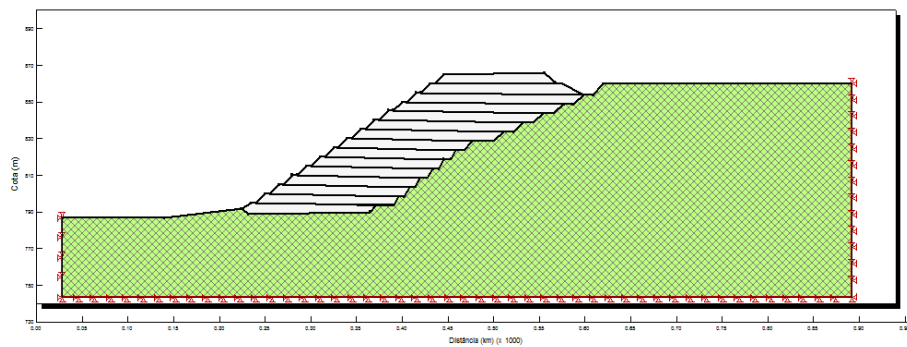


Figura 5.42: Fase da escavação do terreno

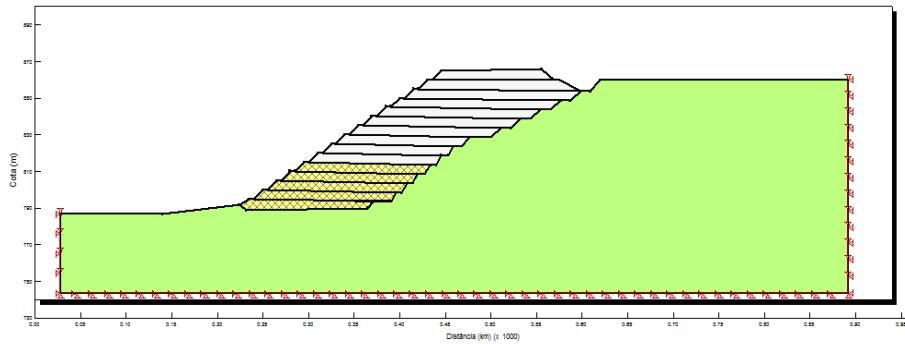


Figura 5.43: Fase de ocupação simulada (5 camadas)

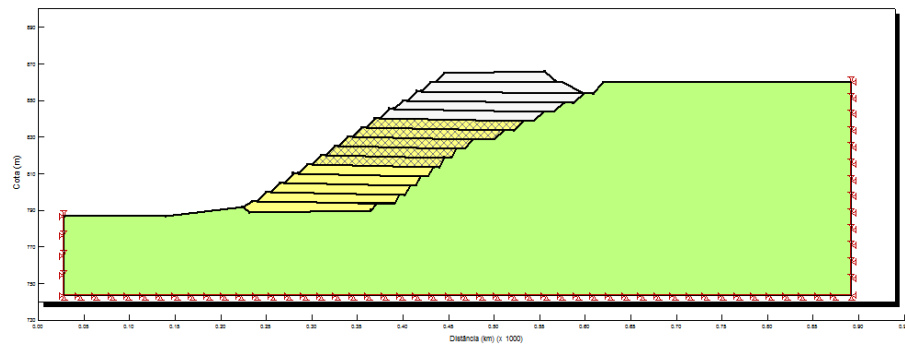


Figura 5.44: Fase de ocupação simulada (10 camadas)

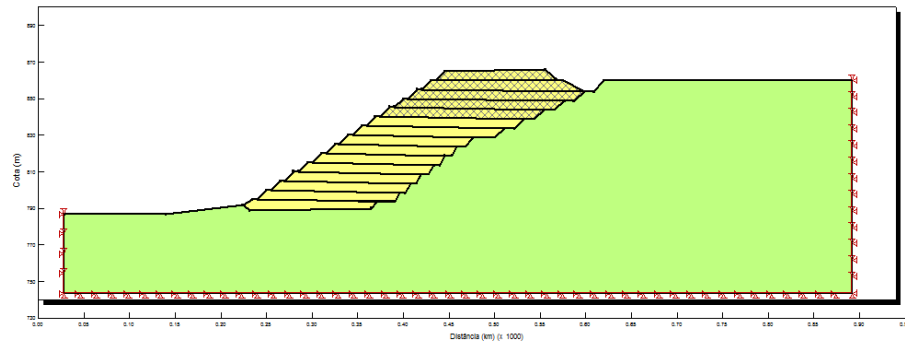


Figura 5.45: Fase de ocupação simulada (15 camadas)

6 CONCLUSÕES

O comportamento mecânico dos RSU não é ainda totalmente compreendido no meio técnico e científico, apesar dos muitos avanços advindos de pesquisas e observações de campo, principalmente nos últimos 15 anos. Sabe-se que os RSU são muito deformáveis e geralmente não apresentam indícios de ruptura nos níveis de deformação usuais de ensaios de campo e laboratório.

Nesta pesquisa, as maiores deformações obtidas nos ensaios de placa realizados no CGR Itapevi foram de cerca de 20%, valor dentro do padrão de comportamento de aterros sanitários, porém insuficiente para que fosse atingida a ruptura. Os valores de coesão e ângulo de atrito calculados para diversos níveis de deformação foram inferiores aos provenientes de retroanálises de rupturas ocorridas em aterros sanitários brasileiros. É importante salientar que os parâmetros de resistência ao cisalhamento resultantes desta pesquisa são apenas indicativos, uma vez que não ocorreu ruptura durante os ensaios de placa, condição para qual a teoria de capacidade de carga de Terzaghi foi formulada. Deformações mais elevadas, correspondentes àquelas em que as rupturas de aterros sanitários ocorrem, permitiriam que fossem realmente estimados os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU.

Nos ensaios nos quais um estágio de carregamento foi mantido por um longo período de tempo, foi nítido o comportamento viscoso dos RSU. Observaram-se recalques 3 a 12 vezes superiores quando os RSU foram submetidos a tensões da ordem de 120 kPa por 8 horas consecutivas.

O módulo de elasticidade determinado considerando comportamento elástico-linear para os RSU variou entre 800 kPa e 3.000 kPa quando calculado pela fórmula de recalque de placa circular rígida derivada da teoria da elasticidade. Quando estimado por retroanálise, por meio de simulação numérica do ensaio, os resultados obtidos variaram entre 1.250 kPa a 4.000 kPa. A literatura apresenta resultados de módulo de elasticidade entre 500 kPa e 6000 kPa (MANASSERO; VAN IMPE; BOUAZZA, 1996; PONTES FILHO; SANTOS; JUCÁ, 1998; SANTOS; JUCÁ; ARAGÃO, 1998; CARVALHO, 1999). Considerando a heterogeneidade do material estudado, o intervalo de valores de módulo de elasticidade obtidos nesta pesquisa,

tanto pela equação derivada da teoria da elasticidade, quanto por simulações numéricas, está coerente com os valores indicados na literatura especializada.

Quando considerado comportamento elasto-plástico para os RSU, as simulações numéricas realizadas indicaram valores de módulo de elasticidade variando entre 1.750 kPa a 12.500 kPa, muito superiores às estimativas apresentadas por outros autores e pelos resultados desta pesquisa que consideraram o comportamento dos RSU como elástico-linear.

A hipótese de comportamento elástico-linear pode fornecer resultados aceitáveis com boa aproximação para problemas práticos no caso de materiais que não atendem aos requisitos de material elástico quando ocorrem carregamentos crescentes e a baixos níveis de tensões, como foi o caso dos ensaios de placa realizados no aterro sanitário. Provavelmente, por este motivo, o comportamento real ocorrido nos ensaios ajustou-se melhor ao modelo elástico-linear do que ao modelo elasto-plástico.

Para as simulações numéricas realizadas tanto considerando o comportamento elástico-linear quanto o comportamento elasto-plástico, observa-se que as curvas de deslocamento em função da tensão aplicada obtidas por simulação numérica são não lineares, apresentando uma tendência de ocorrerem maiores variações de deslocamento em função da variação da tensão para níveis mais altos de tensão. No entanto, as curvas de deslocamento em função da tensão aplicada obtidas nos ensaios de placa apresentaram-se praticamente lineares.

Ao contrário do comentado por Carvalho (1999) e por Bray et al. (2009), não se observou enrijecimento dos RSU em decorrência do aumento das tensões aplicadas. A variação observada do módulo de elasticidade em função da carga aplicada não mostra uma tendência definida considerando-se o conjunto dos ensaios e a variação experimental.

O CGR Itapevi pode ser considerado representativo dos aterros sanitários de grande porte no Brasil em termos de composição dos RSU, conformação geométrica, qualidade da compactação realizada na disposição dos resíduos e das camadas intermediárias de cobertura em solo, e sistemas de drenagem e impermeabilização. A análise dos resultados dos ensaios de placa realizados no CGR Itapevi vem, portanto, contribuir para os conhecimentos da geotecnia ambiental aplicada ao

comportamento deformacional e à estabilidade geotécnica de aterros sanitários brasileiros.

No entanto, na utilização ou análise dos valores de parâmetros geotécnicos obtidos nesta pesquisa, cabe lembrar os resultados de investigações que envolvam ensaios *in situ* em aterros sanitários são fortemente influenciados pela qualidade operacional, eficiência dos sistemas de proteção ambiental e composição dos RSU.

7 SUGESTÕES PARA PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA

Para o prosseguimento da pesquisa sugere-se:

- Investigar os deslocamentos de um maciço sanitário em diversas fases de sua operação, a partir dos resultados obtidos para o módulo de elasticidade nesta pesquisa e de simulações numéricas com o *software* SIGMA/W.
- Relacionar os deslocamentos e deformações obtidas na simulação do comportamento tensão-deformação de um maciço sanitário com valores aceitáveis segundo a prática de projeto e monitoramento de aterros sanitários.
- Construir célula experimental em aterro sanitário e provocar ruptura da mesma com monitoramento geotécnico para realizar retro-análise e obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento.
- Aplicar aos resultados experimentais desta pesquisa, em particular aos pontos P11, P14 e P15, modelos que considerem a viscosidade.
- Realizar ensaios de carregamento de longa duração em um aterro sanitário para investigar mais profundamente o comportamento viscoso dos RSU.
- Procurar diferenciar o comportamento mecânico de resíduos novos e antigos por meio de novos ensaios em regiões de tempo de disposição bem definido.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABMS - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. (s.d.). Acesso em 25 de 06 de 2011, disponível em <http://www.abms.com.br/home/temas/geoambiental/indice/512-a-ruptura-do-aterro-de-itaquaquetuba>

ABMS/ABEF - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica / Associação Brasileira de Engenharia de Fundações. (1996). **Fundações. Teoria e Prática**. Eds: W. Hachich, F. F. Falconi, J.L. Saes, R.G.Q. Frota, C.S. Carvalho e S. Niyama. Edit. PINI.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). **NBR 10004 - Resíduos sólidos – Classificação**.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). **NBR 6489 – Prova de carga direta sobre terreno de fundação**.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2011). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2010**.

ABREU, R. C. (2000). **Compressibilidade de maciços sanitários**. 2000. 241 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.

ATCP Engenharia Física. (2010). **Informativo Técnico-Científico ITC-ME/ATCP: Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização**.

AZEVEDO, R. F., RIBEIRO, A. G., & AZEVEDO, I. D. (2006). **Determination of municipal solid waste strength parameters using a large dimension lisimeter test**. *International Symposium on Solid Waste Treatment, Proceedings*. Rio de Janeiro.

BACHUS, R. C. (2007). **Settlement profiling instrumentation system to assess waste compressibility**. *7th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics* (pp. 1-12). ASCE.

BENVENUTO, C. (15 de outubro de 2008). **Estabilidade de aterros sanitários. Arquivos da apresentação realizada na Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública - ABLP**. São Paulo, SP, Brasil.

- BENVENUTO, C., & CUNHA, M. A. (1991). **Escorregamento de massa de lixo no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo, SP**. *Simpósio sobre barragens de rejeitos e disposição de resíduos - REGEO*, (pp. 55-66). Rio de Janeiro.
- BORGATTO, A. V. (2006). **Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos**. 2006. 157 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia civil) COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BOSCOV, M. E. (2006). **Desafios geotécnicos no projeto e construção de aterros de resíduos**. *XIII COBRAMSEG - XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Anais*, (pp. 1-30, v. 4). Curitiba.
- BOSCOV, M. E. (2008). **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de textos.
- BOSCOV, M. E., & ABREU, R. C. (2000). **Aterros sanitários**. In: ABMS/NRSP, *Previsão de desempenho x Comportamento real* (pp. 7-43).
- BOWDERS, J. e. (2000). **Settlement of municipal solid waste landfills**. *4th Kansai International Geotechnical Forum*. Kyoto.
- BRAY, J. D. (2009). **Shear strength of municipal solid waste**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 709-722, junho de 2009.
- BUREAU DE PROJÉTOS. (2010). **Proposta técnica e comercial nº PTC-SP-002/10: Execução de provas de carga em aterro sanitário - PGR Itapevi - São Paulo - SP**.
- BUREAU DE PROJÉTOS. (2011). **Relatório Técnico RIS-SP-294/10: Execução de Provas de Carga em Aterro Sanitário PGR – Itapevi. São Paulo**.
- CAMPI, T. M., & BOSCOV, M. E. (2011). **Determination of Shear Strength Parameters of Municipal Solid Waste (MSW) by means of static plate load tests**. *Geo-Frontiers 2011* (pp. 1227-1236). Dallas: ASCE.
- CARVALHO, M. F. (1999). **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 1999. 330 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, Brasil.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2006). **Pasta Administrativa 00008/06 - Encerramento do aterro sanitário Sítio São João**.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2000). **Pasta Administrativa 00088/00 - Encerramento do aterro sanitário Pajoan.**

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2009). **Relatório de Vistoria 003/09/TACR/LPGP.**

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. (1980). **Relatório Técnico.**

CRUZ, P. T. (1996). **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto.** São Paulo: Oficina de textos.

DE LAMARE NETO, A. (Março de 2004). **Resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos e de materiais granulares com fibras.** 2004. 190 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DGGT, D. G. (1994). **Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten". E 1-7: Identifizierung und Beschreibung von Abfällen (Entwurf).** Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.

DIAS, S. M., & VAZ, L. M. (2002). **Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos: uma etapa preliminar no gerenciamento do lixo.** *XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, (pp. 1-5). Cancún.

ECOURBIS AMBIENTAL S/A. (2007). **Novo plano de encerramento e fechamento do aterro sanitário Sítio São João.** *Relatório Técnico.*

ESTRE AMBIENTAL S/A. (2004). **RAP - Relatório Ambiental Preliminar: Ampliação da Capacidade de Recepção Diária de Resíduos Sólidos Domiciliares e Industriais Classe II e III - Centro de Gerenciamento de Resíduos CGR - Itapevi.**

FRÉSCA, F. R. (2007). **Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física.** 2007. 134 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

FUZARO, J. A. (Setembro de 2006). **Gestão de resíduos sólidos domiciliares - Curso de especialização em Gestão de resíduos sólidos (Apresentação eletrônica).** Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.

GEO-SLOPE International Ltd. (maio de 2009). **Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W 2007 – An Engineering Methodology**. 4th Edition.

HACHICH, W. (1978). **Sobre a segurança nos projetos de Geotecnia**. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.

HENDRON, D. M. (2006). **Large landslide risks in solid waste facilities... Geotechnical fundamentals count**. *Geo-Strata* , pp. 28-30.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (s.d.). **IBGE - Cidades**. Acesso em 25 de 06 de 2011, disponível em <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>

KAVAZANJIAN, E. (31 de maio de 2010). **Landfill Satability**. Arquivos da apresentação realizada em oficina técnica da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB. São Paulo, SP, Brasil.

KAVAZANJIAN, E. (2006). **Waste mechanics: Recent findings and unanswered questions**. In: ASCE, *Unsaturated Soil, Seepage, and Environmental Geotechnics (GSP 148)*.

KAVAZANJIAN, E., & MERRY, M. S. (2005). **The 10 July 2000 Payatas landfill failure**. *Proceedings of. Sardinia '05 - 10th International Waste Management and Landfill Symposium (on CD ROM)* , (pp. 2-10). Cagliari.

KAVAZANJIAN, E., MATASOVIC, N., & BACHUS, R. C. (1999). **Large-diameter static and cyclic laboratory testing of municipal solid waste**. *Proceedings of Sardinia '99 - 7th International Waste Management and Landfill Symposium, Environmental Sanitary Engineering Centre (CISA), University of Padua, Italy* , pp. p. 437-444.

KNOCHENMUS, G., WOJNAROWICZ, M., & VAN IMPE, W. F. (1998). **Stability of municipal solid wastes**. *3 th International Congress on Environmental Geotechnics, Lisbon* , pp. 1-24.

KOELSCH, F. e. (2005). **Stability of landfills – the Bandung dumpsite disaster**. *Proceedings of the 10th Int. Landfill Symposium*. Cagliari.

KÖLSCH, F. (s.d.). **Bandung (GB)**. Acesso em 28 de 06 de 2011, disponível em Dr. Kölsch's international websites://<http://www.dr-koelsch.de>

KÖLSCH, F. (1995). **Material values for some mechanical properties of domestic waste**. *Proceedings Sardinia 95. 5th International Landfill Symposium*, (pp. 1-20). Cagliari.

KÖLSCH, F. (s.d.). **RUMPKE (GB)**. Acesso em 21 de 06 de 2011, disponível em Dr. Kölsch's international websites: <http://www.dr-koelsch.de>

LAMBE, T. W., & WHITMAN, R. V. (1979). **Soil Mechanics: SI Version**. New York: John Wiley & Sons.

LANDVA, & KNOWLES. (1990). **Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice**. ASTM.

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

MARQUES, A. C. (2001). **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos**. 2001. 468 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, Brasil.

MERRY, M. S., KAVAZANJIAN, E., & FRITZ, W. U. (2005). **Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas landfill failure**. *Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE*, pp. 100-107, maio de 2005.

PINTO, C. S. (2006). **Curso básico de mecânica dos solos, 3ª ed.** São Paulo: Oficina de textos.

PMSP - Prefeitura Municipal de São Paulo. (1997). **Caracterização e comportamento geológico-geotécnico de maciços de resíduos sólidos domiciliares - Relatório Final**. São Paulo.

PONTES FILHO, I., SANTOS, S. M., & JUCÁ, J. F. (1998). **Bearing capacity on solid waste in Recife, Brazil**. *3th International Congress on Environmental Geotechnics*. Lisbon.

REDDY, K. R. (2009). **Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA**. *Waste Management* #29, 952-959.

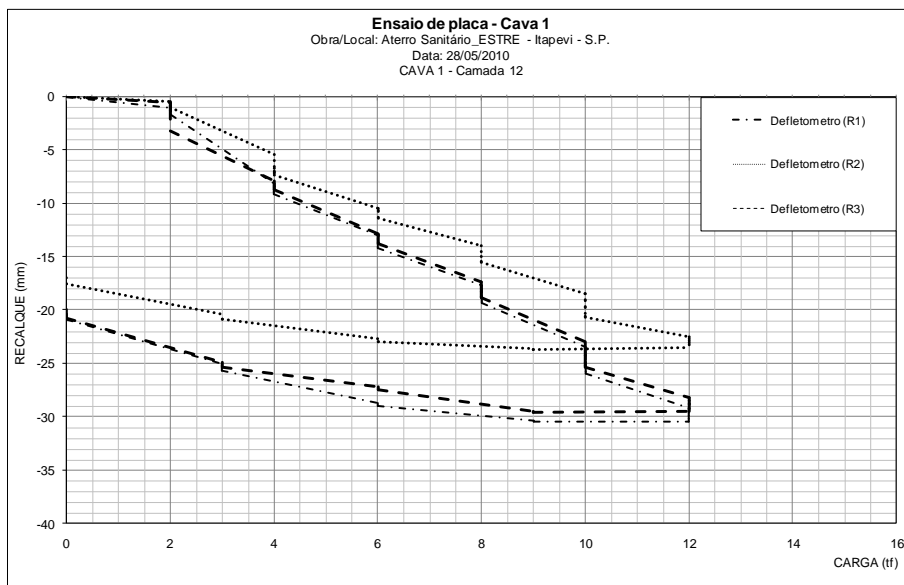
- SANTOS, M. S., JUCÁ, J. F., & ARAGÃO, J. M. (1998). **Geotechnical properties of a solid waste landfill: Muribeca's case.** *3th International Congress on Environmental Geotechnics*. Lisbon.
- SOWERS, G. F. (1973). **Settlement of waste disposal fills.** *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 201-210). Moscow: ASCE.
- STUERMER, M. M. (2006). **Contribuição ao estudo de um solo saprolítico como revestimento impermeabilizante de fundo de aterros de resíduos.** 2006. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- STULGIS, R. P., SOYDEMIR, C., & TELGENER, R. J. (1995). **Predicting landfill settlement.** In: ASCE, *Geoenvironment 2000 - GSP n° 46* (pp. 980-994). ASCE.
- TERZAGHI, K. (1943). **Theoretical Soil Mechanics.**
- VARGAS, M. (1977). **Introdução à mecânica dos solos.** São Paulo: Mc Graw Hill.
- VILAR, O. M., et al. **Some remarks on the mechanical properties and modeling of Municipal Solid Waste.** *International Symposium on Solid Waste Treatment, Proceedings*. Rio de Janeiro.
- ZEKKOS, D. e. (2010). **Large-scale direct shear testing of municipal solid waste.** *Waste Management* #30, 1544-1555.

ANEXO A

Planilhas e gráficos gerados a partir dos ensaios de placa:

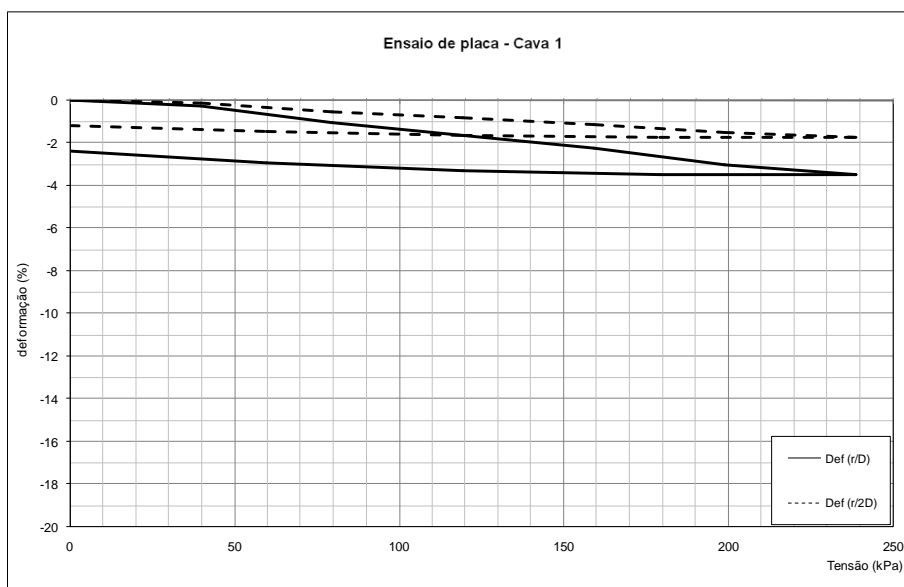
Gráficos: carregamentos x recalques e tensões x deformações

CAVA 1		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
13:38	0,00	0,00
13:40	2,00	-0,63
13:42	2,00	-0,97
13:44	2,00	-0,83
13:48	2,00	-1,17
13:55	2,00	-1,28
14:10	2,00	-1,90
14:15	4,00	-7,13
14:17	4,00	-7,76
14:19	4,00	-7,98
14:23	4,00	-8,08
14:30	4,00	-8,23
14:45	4,00	-8,34
14:54	6,00	-12,06
14:56	6,00	-12,26
14:58	6,00	-12,35
15:02	6,00	-12,37
15:09	6,00	-12,96
15:24	6,00	-13,11
15:30	8,00	-16,31
15:32	8,00	-16,75
15:34	8,00	-16,93
15:38	8,00	-17,31
15:45	8,00	-17,75
16:00	8,00	-17,87
16:05	10,00	-21,61
16:07	10,00	-22,26
16:09	10,00	-22,94
16:13	10,00	-23,53
16:20	10,00	-23,80
16:35	10,00	-23,98
16:43	12,00	-26,63
16:45	12,00	-26,87
16:47	12,00	-27,07
16:51	12,00	-27,22
16:58	12,00	-27,52
17:13	12,00	-27,83
17:19	9,00	-27,89
17:24	9,00	-27,82
17:26	6,00	-26,46
17:31	6,00	-26,16
17:33	3,00	-23,93
17:38	3,00	-23,41
17:40	0,00	-19,70
17:45	0,00	-18,95

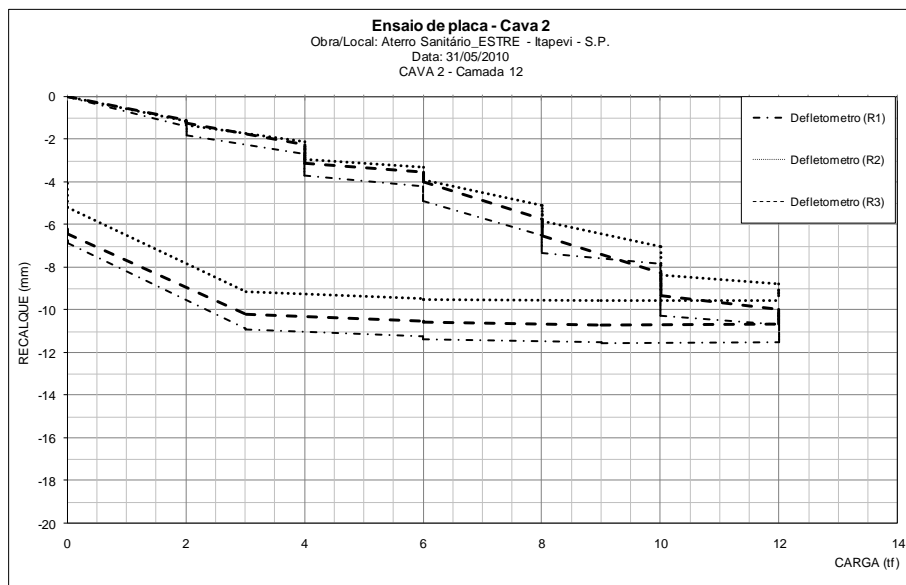


*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (p/D) (%)	Def (p/2D) (%)
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	2,00	39,79	-1,90	-0,24	-0,12
30	4,00	79,58	-8,34	-1,04	-0,52
30	6,00	119,37	-13,11	-1,64	-0,82
30	8,00	159,15	-17,87	-2,23	-1,12
30	10,00	198,94	-23,98	-3,00	-1,50
30	12,00	238,73	-27,83	-3,48	-1,74
5	9,00	179,05	-27,82	-3,48	-1,74
5	6,00	119,37	-26,16	-3,27	-1,64
5	3,00	59,68	-23,41	-2,93	-1,46
5	0,00	0,00	-18,95	-2,37	-1,18

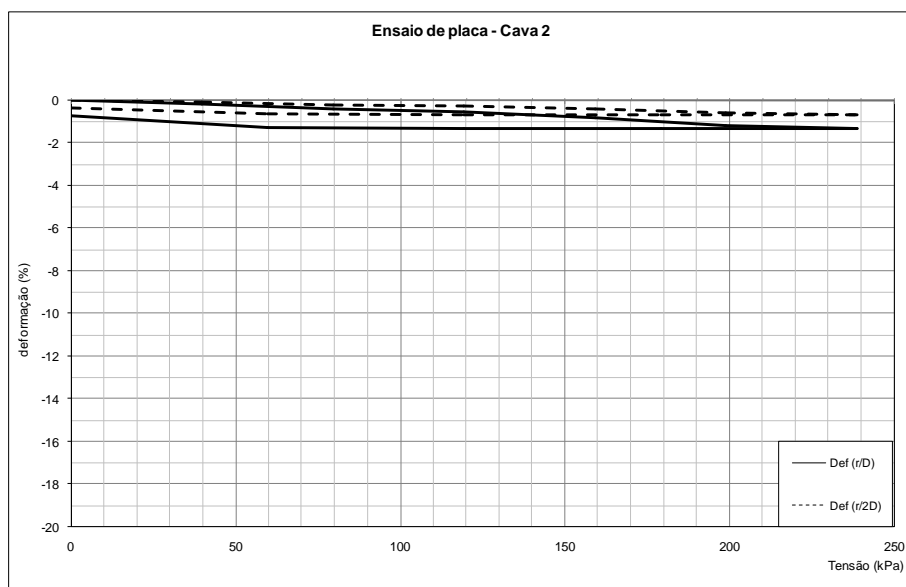


CAVA 2		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
14:16	0,00	0,00
14:17	2,00	-1,21
14:19	2,00	-1,26
14:21	2,00	-1,27
14:25	2,00	-1,31
14:32	2,00	-1,34
14:47	2,00	-1,43
14:50	4,00	-2,34
14:52	4,00	-2,54
14:54	4,00	-2,72
14:58	4,00	-2,94
15:05	4,00	-3,05
15:20	4,00	-3,25
15:22	6,00	-3,66
15:24	6,00	-3,96
15:26	6,00	-4,04
15:30	6,00	-4,09
15:37	6,00	-4,19
15:52	6,00	-4,25
15:54	8,00	-5,77
15:56	8,00	-5,92
15:58	8,00	-6,07
16:02	8,00	-6,16
16:09	8,00	-6,20
16:24	8,00	-6,54
16:30	10,00	-7,70
16:32	10,00	-8,15
16:34	10,00	-8,74
16:38	10,00	-8,83
16:45	10,00	-9,06
17:00	10,00	-9,30
17:03	12,00	-9,80
17:05	12,00	-10,09
17:07	12,00	-10,19
17:11	12,00	-10,24
17:18	12,00	-10,38
17:33	12,00	-10,55
17:34	9,00	-10,58
17:39	9,00	-10,57
17:40	6,00	-10,46
17:45	6,00	-10,40
17:47	3,00	-10,07
17:52	3,00	-10,04
17:55	0,00	-6,15
18:00	0,00	-5,62

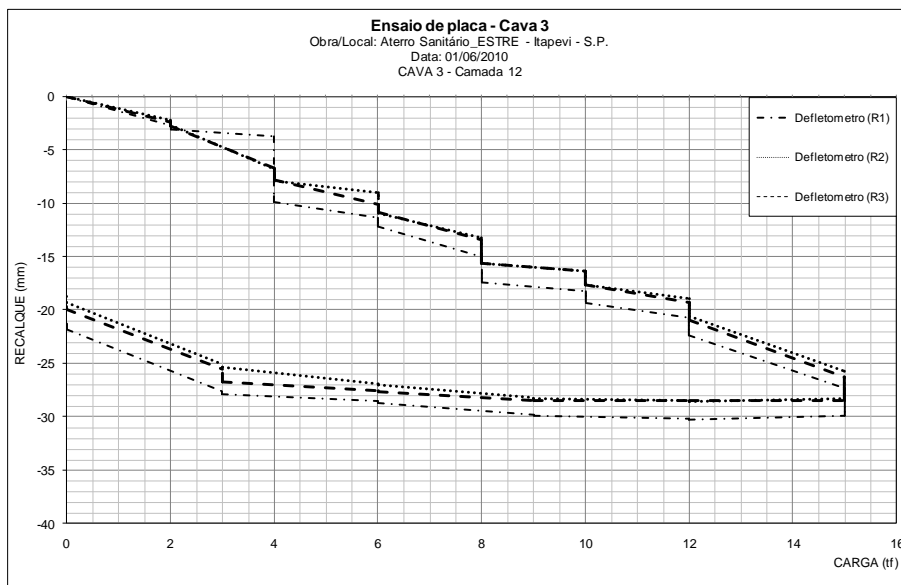


*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (p/D) (%)	Def (p/2D) (%)
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	2,00	39,79	-1,43	-0,18	-0,09
30	4,00	79,58	-3,25	-0,41	-0,20
30	6,00	119,37	-4,25	-0,53	-0,27
30	8,00	159,15	-6,54	-0,82	-0,41
30	10,00	198,94	-9,30	-1,16	-0,58
30	12,00	238,73	-10,55	-1,32	-0,66
5	9,00	179,05	-10,57	-1,32	-0,66
5	6,00	119,37	-10,40	-1,30	-0,65
5	3,00	59,68	-10,04	-1,26	-0,63
5	0,00	0,00	-5,62	-0,70	-0,35

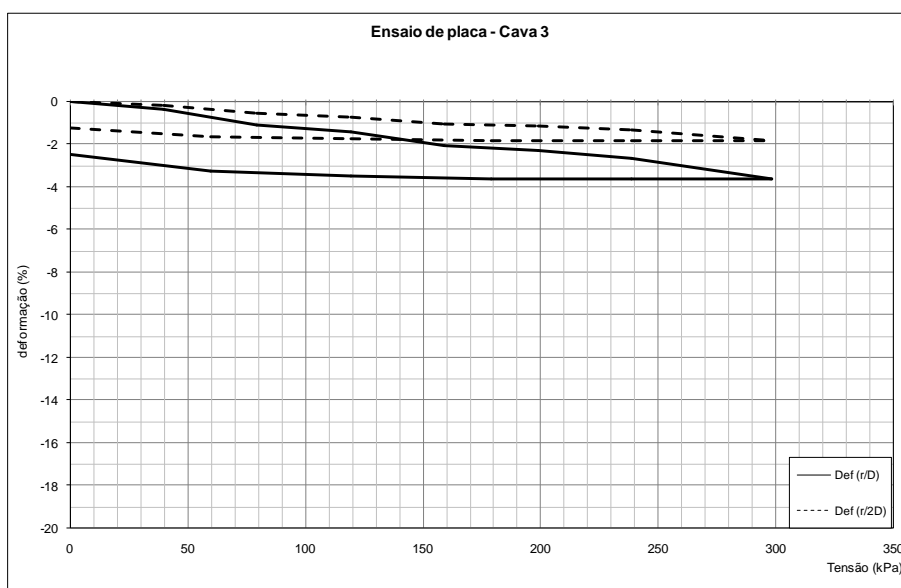


CAVA 3		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
11:30	0,00	0,00
11:35	2,00	-2,40
11:37	2,00	-2,45
11:39	2,00	-2,45
11:43	2,00	-2,54
11:50	2,00	-2,65
12:05	2,00	-2,77
12:06	4,00	-5,69
12:08	4,00	-7,90
12:10	4,00	-7,99
12:14	4,00	-8,08
12:21	4,00	-8,17
12:36	4,00	-8,49
12:39	6,00	-10,12
12:41	6,00	-10,25
12:43	6,00	-10,36
12:47	6,00	-10,43
12:54	6,00	-10,57
13:09	6,00	-11,28
13:10	8,00	-13,86
13:12	8,00	-15,04
13:14	8,00	-15,26
13:18	8,00	-15,40
13:25	8,00	-15,86
13:40	8,00	-16,19
13:42	10,00	-16,95
13:44	10,00	-17,13
13:46	10,00	-17,38
13:50	10,00	-17,44
13:57	10,00	-17,47
14:12	10,00	-18,18
14:15	12,00	-19,62
14:17	12,00	-19,96
14:19	12,00	-20,03
14:23	12,00	-20,25
14:30	12,00	-20,69
14:45	12,00	-21,25
14:48	15,00	-26,42
14:50	15,00	-27,09
14:52	15,00	-27,60
14:56	15,00	-28,10
15:03	15,00	-28,57
15:17	15,00	-28,89
15:19	12,00	-29,09
15:24	12,00	-29,02
15:26	9,00	-28,87
15:31	9,00	-28,85
15:33	6,00	-27,80
15:38	6,00	-27,64
15:40	3,00	-26,63
15:45	3,00	-26,05
15:47	0,00	-20,33
15:52	0,00	-19,54

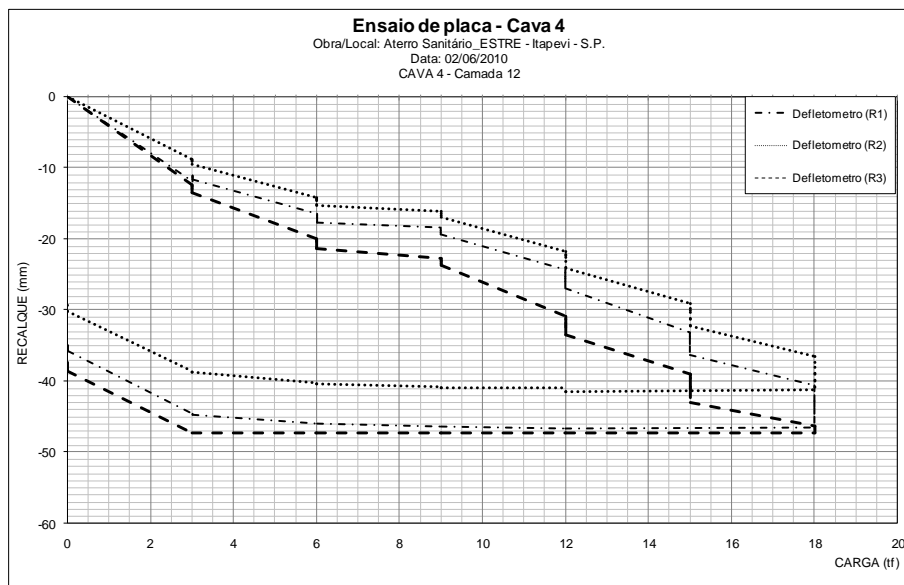


*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (p/D) (%)	Def (p/2D) (%)
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	2,00	39,79	-2,77	-0,35	-0,17
30	4,00	79,58	-8,49	-1,06	-0,53
30	6,00	119,37	-11,28	-1,41	-0,71
30	8,00	159,15	-16,19	-2,02	-1,01
30	10,00	198,94	-18,18	-2,27	-1,14
30	12,00	238,73	-21,25	-2,66	-1,33
30	15,00	298,42	-28,89	-3,61	-1,81
5	12,00	238,73	-29,02	-3,63	-1,81
5	9,00	179,05	-28,85	-3,61	-1,80
5	6,00	119,37	-27,64	-3,46	-1,73
5	3,00	59,68	-26,05	-3,26	-1,63
5	0,00	0,00	-19,54	-2,44	-1,22

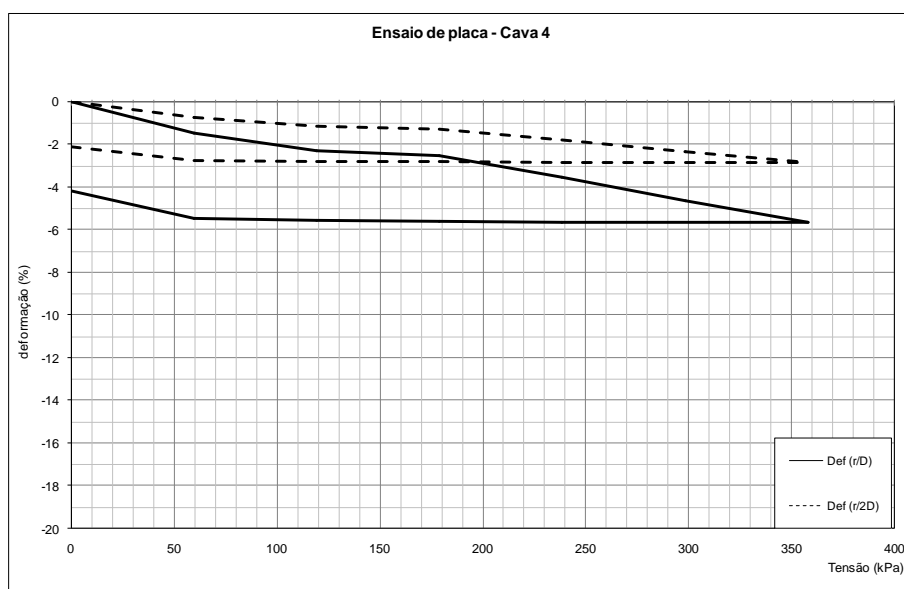


CAVA 4		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
12:05	0,00	0,00
12:08	3,00	-10,97
12:10	3,00	-10,75
12:12	3,00	-10,83
12:16	3,00	-10,91
12:23	3,00	-11,11
12:38	3,00	-11,49
12:43	6,00	-16,81
12:45	6,00	-17,00
12:47	6,00	-17,12
12:51	6,00	-17,27
12:58	6,00	-17,91
13:13	6,00	-18,09
13:14	9,00	-19,06
13:16	9,00	-19,32
13:18	9,00	-19,36
13:22	9,00	-19,44
13:29	9,00	-19,72
13:44	9,00	-19,91
13:48	12,00	-25,62
13:50	12,00	-26,00
13:52	12,00	-26,50
13:56	12,00	-26,64
14:03	12,00	-27,14
14:18	12,00	-28,15
14:26	15,00	-33,72
14:28	15,00	-34,02
14:30	15,00	-34,40
14:34	15,00	-35,04
14:41	15,00	-35,77
14:56	15,00	-37,14
15:02	18,00	-41,10
15:04	18,00	-42,19
15:06	18,00	-42,64
15:10	18,00	-43,32
15:17	18,00	-44,08
15:32	18,00	-44,95
15:35	12,00	-45,09
15:40	12,00	-44,94
15:43	9,00	-44,82
15:48	9,00	-44,79
15:52	6,00	-44,51
15:57	6,00	-44,48
16:02	3,00	-43,54
16:07	3,00	-43,43
16:09	0,00	-34,81
16:14	0,00	-33,17

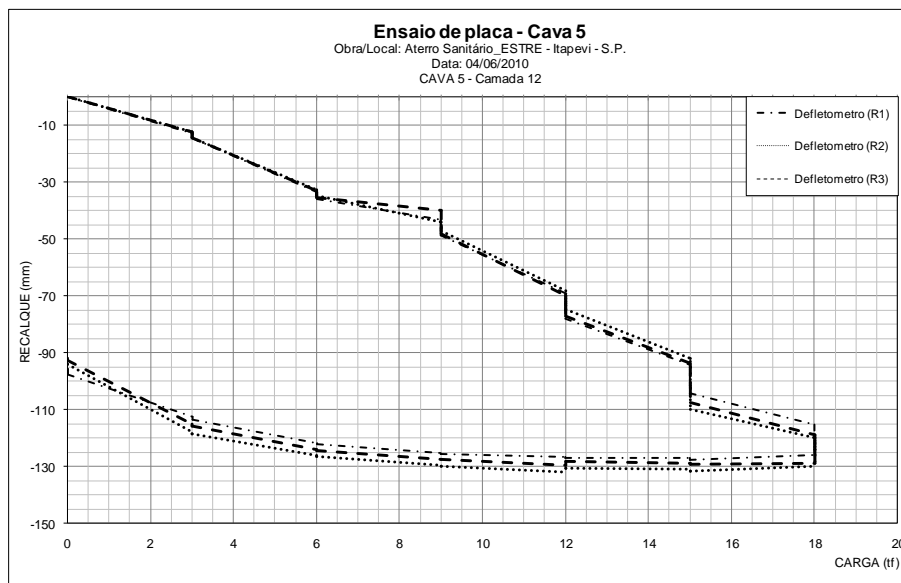


*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (ρ/D) (%)	Def (ρ/2D) (%)
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	3,00	59,68	-11,49	-1,44	-0,72
30	6,00	119,37	-18,09	-2,26	-1,13
30	9,00	179,05	-19,91	-2,49	-1,24
30	12,00	238,73	-28,15	-3,52	-1,76
30	15,00	298,42	-37,14	-4,64	-2,32
30	18,00	358,10	-44,95	-5,62	-2,81
5	12,00	238,73	-44,94	-5,62	-2,81
5	9,00	179,05	-44,79	-5,60	-2,80
5	6,00	119,37	-44,48	-5,56	-2,78
5	3,00	59,68	-43,43	-5,43	-2,71
5	0,00	0,00	-33,17	-4,15	-2,07

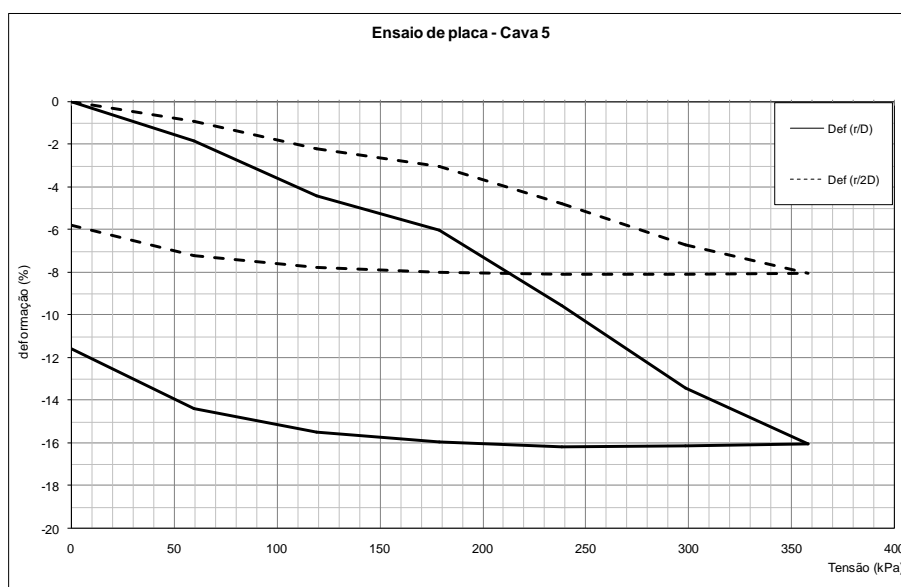


CAVA 5		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
12:40	0,00	0,00
12:46	3,00	-12,47
12:48	3,00	-12,73
12:50	3,00	-12,92
12:54	3,00	-13,04
13:01	3,00	-13,90
13:16	3,00	-14,36
13:17	6,00	-33,07
13:19	6,00	-33,53
13:21	6,00	-34,09
13:25	6,00	-34,41
13:32	6,00	-34,63
13:47	6,00	-35,25
13:50	9,00	-42,37
13:52	9,00	-44,83
13:54	9,00	-45,69
13:58	9,00	-45,94
14:05	9,00	-46,40
14:20	9,00	-47,94
14:30	12,00	-68,98
14:32	12,00	-70,35
14:34	12,00	-71,65
14:38	12,00	-71,74
14:45	12,00	-74,12
15:00	12,00	-76,50
15:04	15,00	-93,24
15:06	15,00	-94,55
15:08	15,00	-100,00
15:12	15,00	-100,40
15:19	15,00	-102,18
15:34	15,00	-107,12
15:42	18,00	-117,88
15:44	18,00	-120,85
15:46	18,00	-121,78
15:50	18,00	-123,94
15:57	18,00	-125,55
16:12	18,00	-128,24
16:15	15,00	-129,42
16:20	15,00	-128,87
16:25	12,00	-128,45
16:30	12,00	-129,23
16:35	9,00	-127,56
16:40	9,00	-127,42
16:43	6,00	-124,29
16:48	6,00	-123,95
16:50	3,00	-115,85
16:55	3,00	-115,12
16:58	0,00	-94,67
17:03	0,00	-92,50

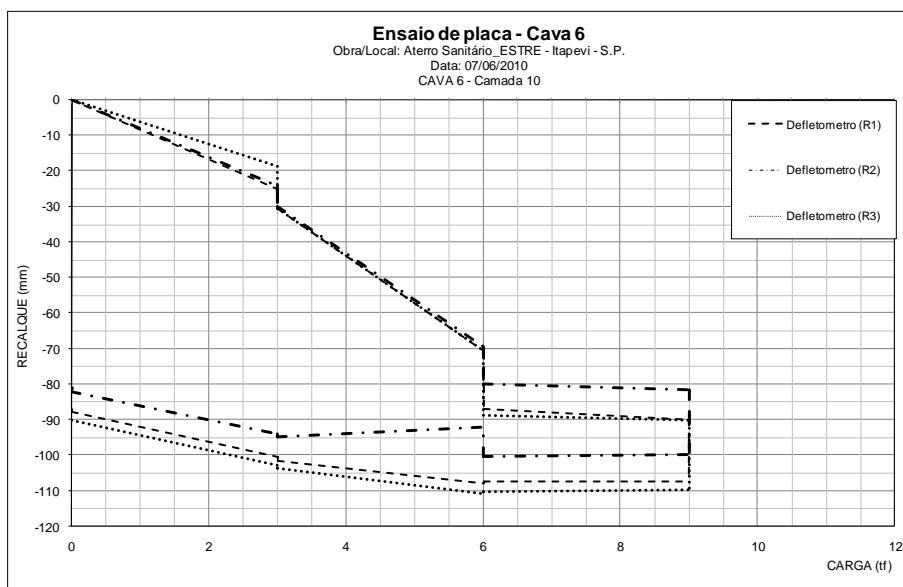


*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (ρ/D) (%)	Def (ρ/2D) (%)
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	3,00	59,68	-14,36	-1,80	-0,90
30	6,00	119,37	-35,25	-4,41	-2,20
30	9,00	179,05	-47,94	-5,99	-3,00
30	12,00	238,73	-76,50	-9,56	-4,78
30	15,00	298,42	-107,12	-13,39	-6,69
30	18,00	358,10	-128,24	-16,03	-8,02
5	15,00	298,42	-128,87	-16,11	-8,05
5	12,00	238,73	-129,23	-16,15	-8,08
5	9,00	179,05	-127,42	-15,93	-7,96
5	6,00	119,37	-123,95	-15,49	-7,75
5	3,00	59,68	-115,12	-14,39	-7,20
5	0,00	0,00	-92,50	-11,56	-5,78

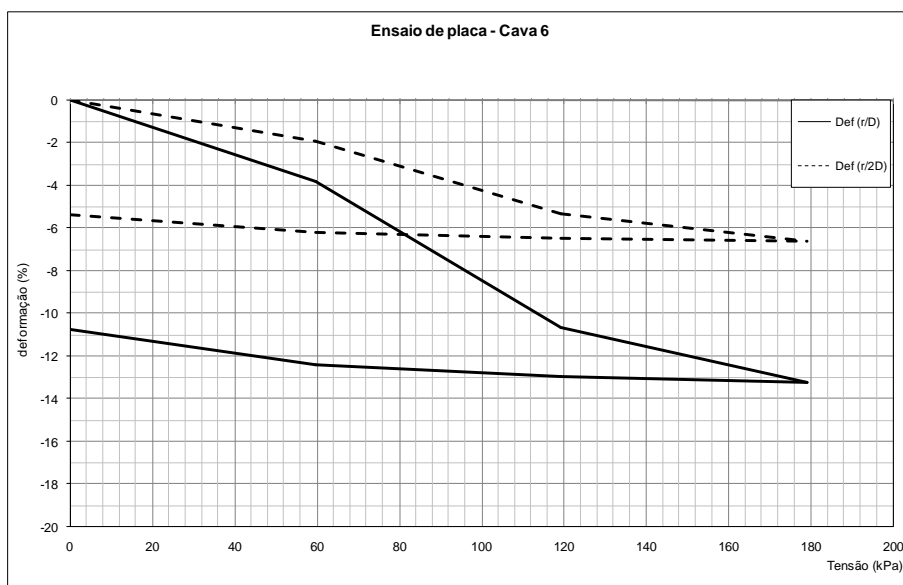


CAVA 6		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
15:30	0,00	0,00
15:34	3,00	-22,65
15:36	3,00	-25,50
15:38	3,00	-25,88
15:42	3,00	-26,32
15:49	3,00	-26,75
16:04	3,00	-30,32
16:15	6,00	-70,13
16:17	6,00	-70,06
16:19	6,00	-72,53
16:23	6,00	-72,53
16:30	6,00	-78,66
16:45	6,00	-85,23
17:17	9,00	-87,13
17:19	9,00	-88,69
17:21	9,00	-93,15
17:25	9,00	-94,26
17:32	9,00	-101,97
17:47	9,00	-105,62
17:50	6,00	-105,96
17:55	6,00	-103,47
18:00	3,00	-99,89
18:05	3,00	-99,01
18:10	0,00	-86,57
18:15	0,00	-85,78

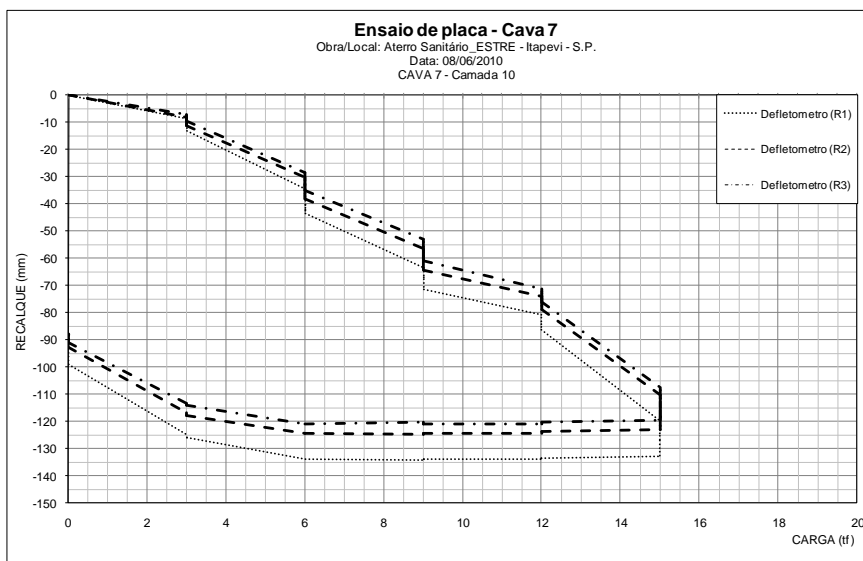


*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (p/D) (%)	Def (p/2D) (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	3,00	59,68	-30,32	-3,79	-1,90
30	6,00	119,37	-85,23	-10,65	-5,33
30	9,00	179,05	-105,62	-13,20	-6,60
5	6,00	119,37	-103,47	-12,93	-6,47
5	3,00	59,68	-99,01	-12,38	-6,19
5	0,00	0,00	-85,78	-10,72	-5,36

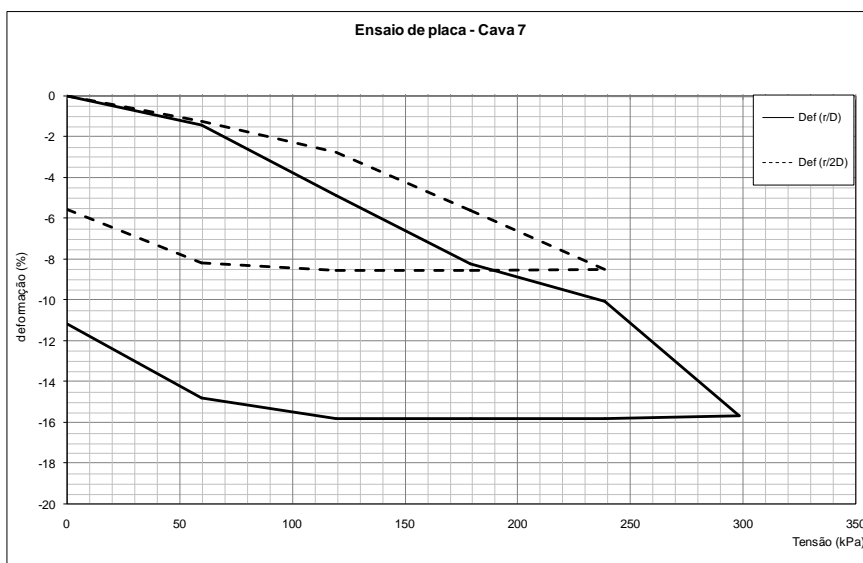


CAVA 7		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
14:04	0,00	0,00
14:05	3,00	-8,00
14:07	3,00	-8,25
14:09	3,00	-8,75
14:13	3,00	-9,71
14:20	3,00	-10,48
14:35	3,00	-11,36
14:40	6,00	-31,15
14:42	6,00	-35,67
14:44	6,00	-36,77
14:48	6,00	-37,43
14:55	6,00	-37,97
15:15	6,00	-38,81
15:20	9,00	-57,48
15:22	9,00	-58,92
15:24	9,00	-60,36
15:28	9,00	-61,21
15:35	9,00	-61,90
15:50	9,00	-65,52
15:52	12,00	-75,28
15:54	12,00	-76,17
15:56	12,00	-77,12
16:00	12,00	-78,09
16:07	12,00	-78,99
16:22	12,00	-80,38
16:35	15,00	-112,38
16:37	15,00	-113,48
16:39	15,00	-117,88
16:43	15,00	-120,15
16:50	15,00	-123,51
17:05	15,00	-125,08
17:10	12,00	-125,76
17:15	12,00	-126,25
17:16	9,00	-126,35
17:21	9,00	-126,24
17:22	6,00	-126,21
17:27	6,00	-126,21
17:28	3,00	-119,12
17:33	3,00	-118,28
17:34	0,00	-94,25
17:39	0,00	-89,11

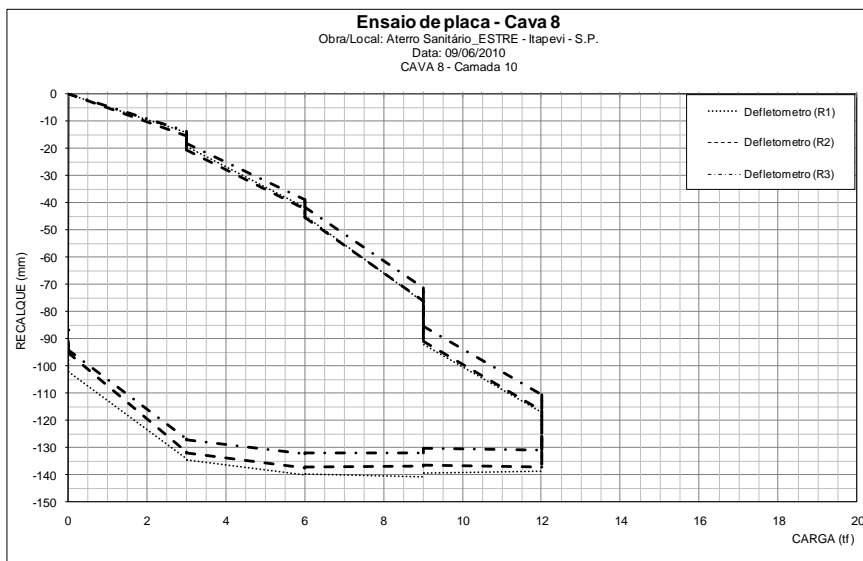


*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (ρ/D) (%)	Def (ρ/2D) (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	3,00	59,68	-11,36	-1,42	-0,71
30	6,00	119,37	-38,81	-4,85	-2,43
30	9,00	179,05	-65,52	-8,19	-4,10
30	12,00	238,73	-80,38	-10,05	-5,02
30	15,00	298,42	-125,08	-15,64	-7,82
5	12,00	238,73	-126,25	-15,78	-7,89
5	9,00	179,05	-126,24	-15,78	-7,89
5	6,00	119,37	-126,21	-15,78	-7,89
5	3,00	59,68	-118,28	-14,79	-7,39
5	0,00	0,00	-89,11	-11,14	-5,57

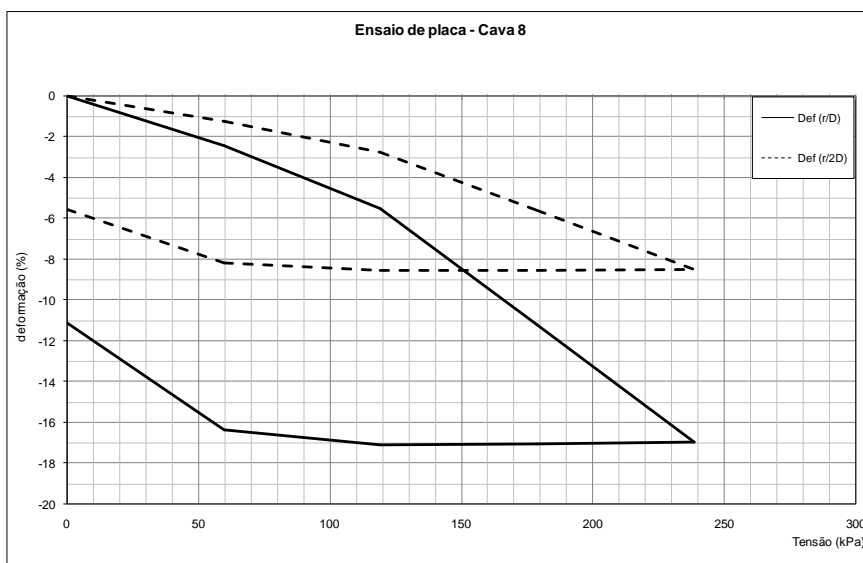


CAVA 8		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
14:58	0,00	0,00
15:00	3,00	-14,35
15:02	3,00	-15,00
15:04	3,00	-15,78
15:08	3,00	-17,12
15:15	3,00	-17,63
15:30	3,00	-19,32
15:35	6,00	-40,91
15:37	6,00	-41,75
15:39	6,00	-42,26
15:43	6,00	-42,68
15:50	6,00	-43,44
16:05	6,00	-43,94
16:14	9,00	-74,48
16:16	9,00	-76,41
16:18	9,00	-76,84
16:22	9,00	-82,81
16:29	9,00	-85,45
16:44	9,00	-89,41
16:52	12,00	-114,56
16:54	12,00	-117,13
16:56	12,00	-125,85
17:00	12,00	-130,51
17:07	12,00	-132,17
17:22	12,00	-135,51
17:25	9,00	-135,29
17:30	9,00	-136,45
17:32	6,00	-136,26
17:37	6,00	-136,56
17:38	3,00	-131,16
17:43	3,00	-130,71
17:44	0,00	-97,08
17:49	0,00	-88,98

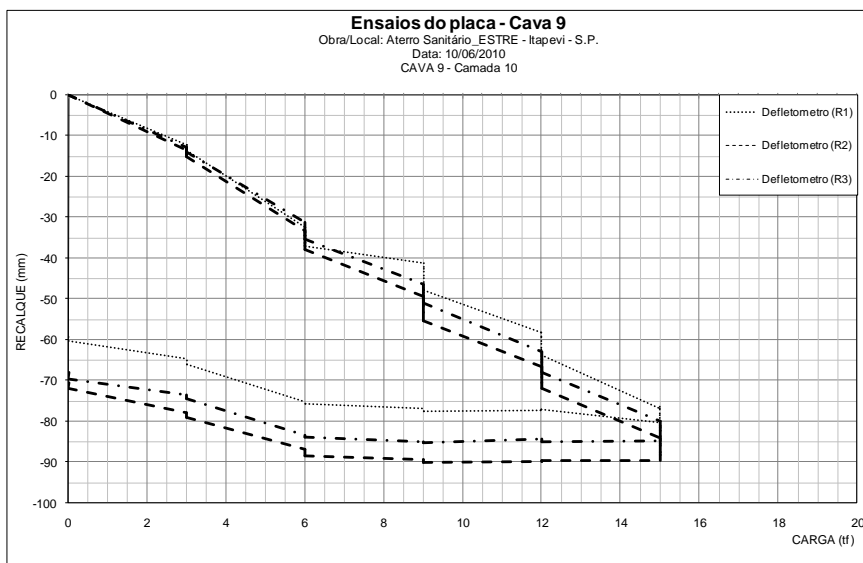


*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (ρ/D) (%)	Def (ρ/2D) (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	3,00	59,68	-19,32	-2,42	-1,21
30	6,00	119,37	-43,94	-5,49	-2,75
30	9,00	179,05	-89,41	-11,18	-5,59
30	12,00	238,73	-135,51	-16,94	-8,47
5	9,00	179,05	-136,45	-17,06	-8,53
5	6,00	119,37	-136,56	-17,07	-8,54
5	3,00	59,68	-130,71	-16,34	-8,17
5	0,00	0,00	-88,98	-11,12	-5,56

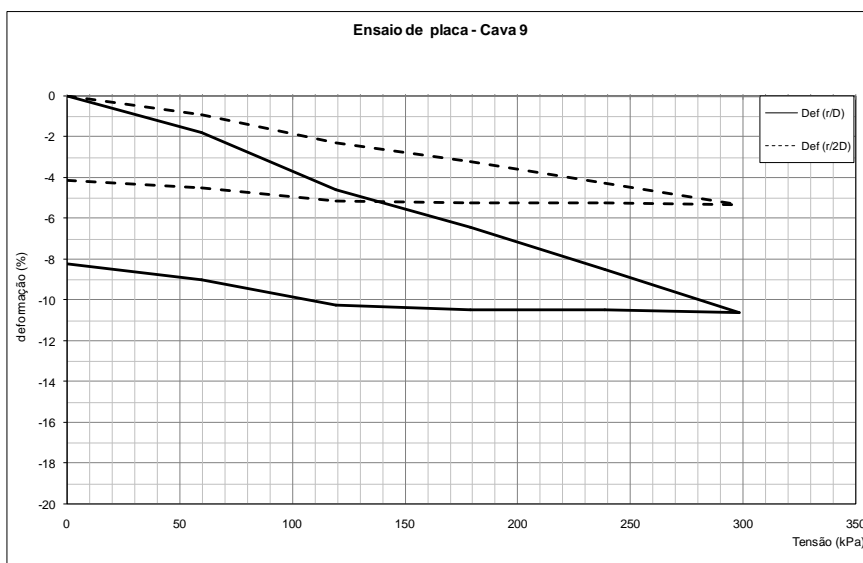


CAVA 9		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
13:28	0,00	0,00
13:30	3,00	-12,80
13:32	3,00	-13,22
13:34	3,00	-13,36
13:38	3,00	-13,48
13:45	3,00	-13,79
14:00	3,00	-14,17
14:05	6,00	-32,22
14:07	6,00	-33,60
14:09	6,00	-34,22
14:13	6,00	-35,04
14:20	6,00	-35,77
14:35	6,00	-36,65
14:46	9,00	-45,55
14:48	9,00	-46,58
14:50	9,00	-47,07
14:54	9,00	-47,68
15:01	9,00	-49,09
15:16	9,00	-51,29
15:20	12,00	-62,55
15:22	12,00	-63,67
15:24	12,00	-64,43
15:28	12,00	-65,15
15:35	12,00	-66,47
15:50	12,00	-67,83
16:02	15,00	-80,21
16:04	15,00	-80,94
16:06	15,00	-81,48
16:10	15,00	-82,70
16:17	15,00	-83,65
16:32	15,00	-84,81
16:34	12,00	-83,79
16:39	12,00	-83,77
16:40	9,00	-84,18
16:45	9,00	-83,61
16:47	6,00	-82,55
16:52	6,00	-81,74
16:53	3,00	-73,08
16:58	3,00	-71,95
16:59	0,00	-67,19
17:04	0,00	-65,80

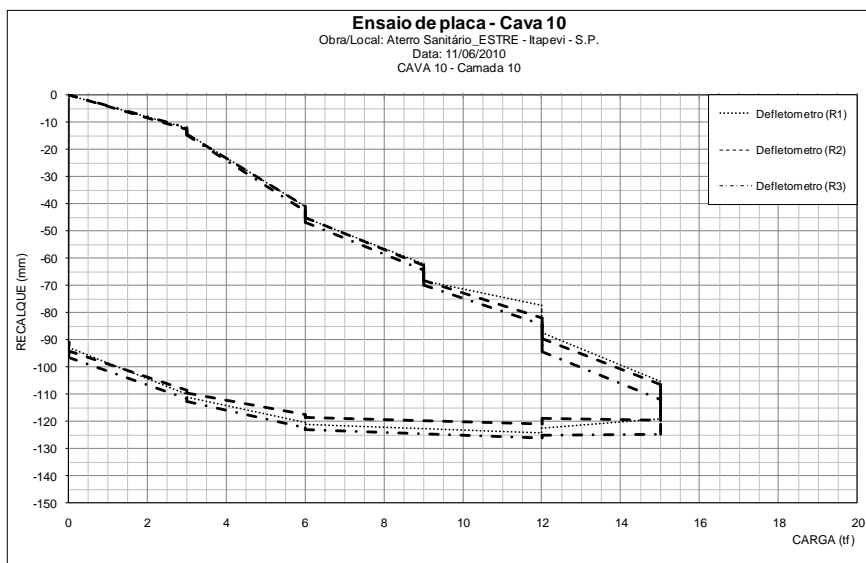


*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (ρ/D) (%)	Def (ρ/2D) (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	3,00	59,68	-14,17	-1,77	-0,89
30	6,00	119,37	-36,65	-4,58	-2,29
30	9,00	179,05	-51,29	-6,41	-3,21
30	12,00	238,73	-67,83	-8,48	-4,24
30	15,00	298,42	-84,81	-10,60	-5,30
5	12,00	238,73	-83,77	-10,47	-5,24
5	9,00	179,05	-83,61	-10,45	-5,23
5	6,00	119,37	-81,74	-10,22	-5,11
5	3,00	59,68	-71,95	-8,99	-4,50
5	0,00	0,00	-65,80	-8,23	-4,11

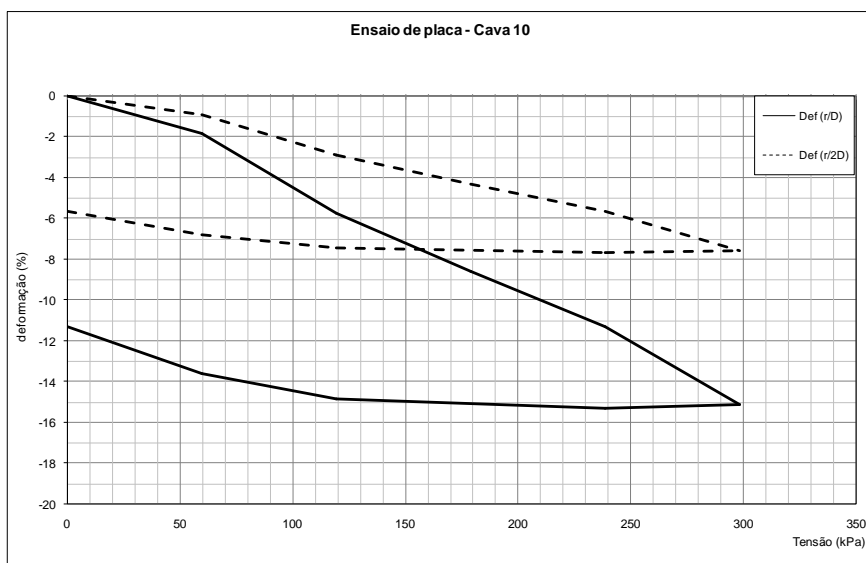


CAVA 10		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
12:42	0,00	0,00
12:43	3,00	-12,20
12:45	3,00	-12,99
12:47	3,00	-13,15
12:51	3,00	-13,45
12:58	3,00	-13,77
13:13	3,00	-14,35
13:17	6,00	-41,43
13:19	6,00	-42,80
13:21	6,00	-43,52
13:25	6,00	-44,15
13:28	6,00	-44,67
13:43	6,00	-45,68
13:59	9,00	-63,00
14:01	9,00	-64,86
14:03	9,00	-65,81
14:07	9,00	-66,17
14:14	9,00	-66,80
14:29	9,00	-68,68
14:45	12,00	-81,13
14:47	12,00	-82,67
14:49	12,00	-82,90
14:53	12,00	-85,35
15:00	12,00	-87,90
15:15	12,00	-90,26
15:23	15,00	-107,88
15:25	15,00	-109,80
15:27	15,00	-111,56
15:31	15,00	-117,13
15:38	15,00	-119,55
15:53	15,00	-120,95
15:55	12,00	-120,66
16:00	12,00	-122,30
16:02	6,00	-119,38
16:07	6,00	-118,63
16:09	3,00	-109,60
16:14	3,00	-108,56
16:15	0,00	-92,98
16:20	0,00	-90,48

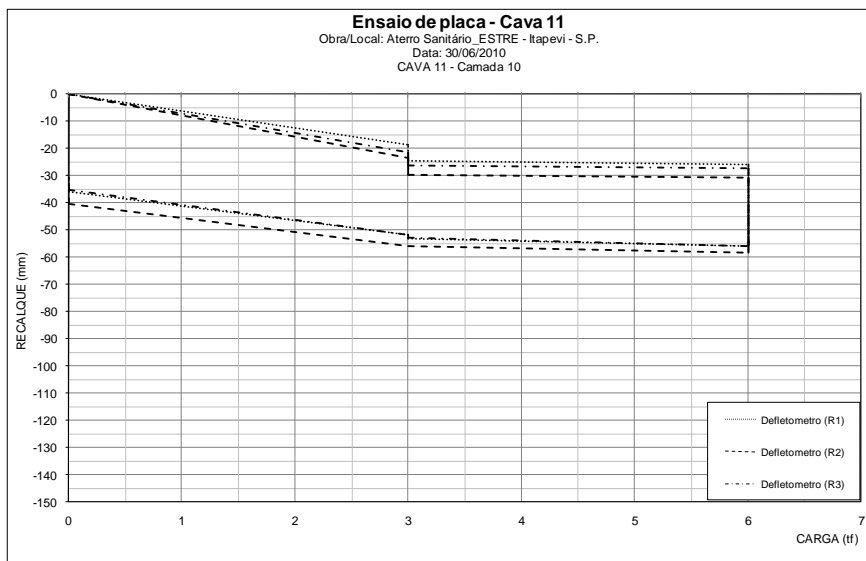


*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (ρ/D) (%)	Def (ρ/2D) (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	3,00	59,68	-14,35	-1,79	-0,90
30	6,00	119,37	-45,68	-5,71	-2,86
30	9,00	179,05	-68,68	-8,59	-4,29
30	12,00	238,73	-90,26	-11,28	-5,64
30	15,00	298,42	-120,95	-15,12	-7,56
5	12,00	238,73	-122,30	-15,29	-7,64
5	6,00	119,37	-118,63	-14,83	-7,41
5	3,00	59,68	-108,56	-13,57	-6,79
5	0,00	0,00	-90,48	-11,31	-5,65

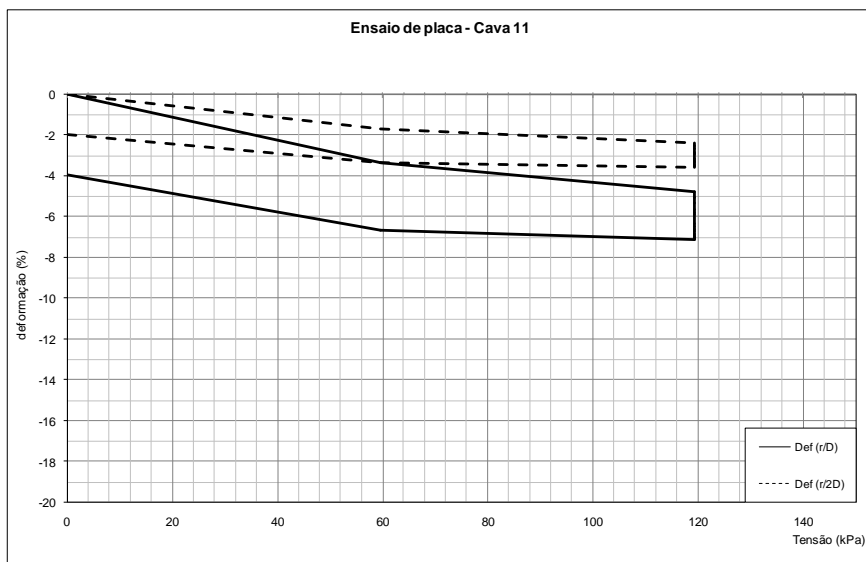


CAVA 11		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
11:05	0,00	0,00
11:08	3,00	-21,09
11:10	3,00	-21,74
11:12	3,00	-21,93
11:16	3,00	-23,43
11:23	3,00	-25,84
11:38	3,00	-26,70
11:43	6,00	-28,00
11:45	6,00	-28,27
11:47	6,00	-28,30
11:51	6,00	-28,33
11:53	6,00	-28,57
11:55	6,00	-28,93
11:57	6,00	-31,54
12:01	6,00	-32,16
12:08	6,00	-32,95
12:23	6,00	-38,13
13:00	6,00	-40,13
13:30	6,00	-42,54
14:00	6,00	-45,07
14:30	6,00	-46,19
15:00	6,00	-47,08
15:30	6,00	-50,74
16:00	6,00	-51,79
16:30	6,00	-52,69
17:00	6,00	-53,43
17:30	6,00	-54,68
18:00	6,00	-55,19
18:30	6,00	-55,68
19:00	6,00	-56,23
19:30	6,00	-56,50
20:00	6,00	-56,69
20:04	3,00	-53,96
20:09	3,00	-53,03
20:10	0,00	-37,15
20:15	0,00	-31,71
20:20	0,00	-31,65
20:25	0,00	-31,59

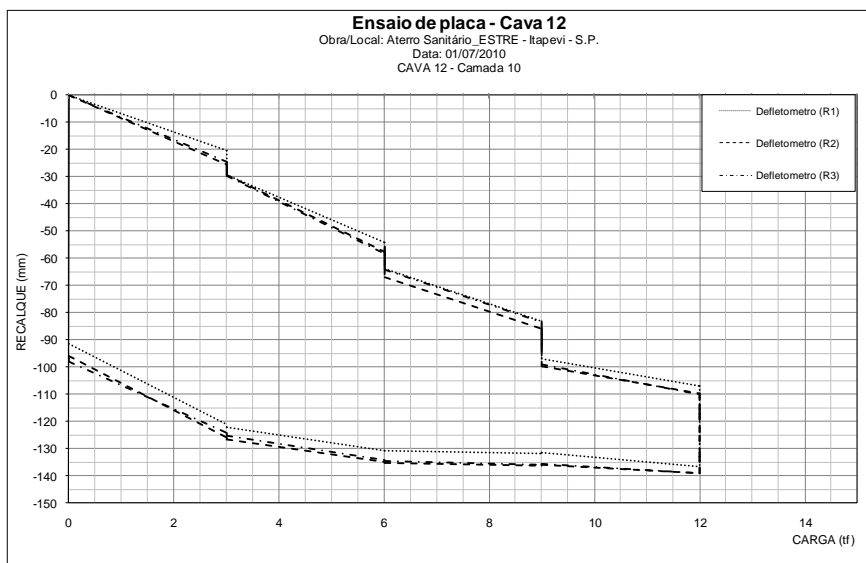


*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (ρ/D) (%)	Def ($\rho/2D$) (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	3,00	59,68	-26,70	-3,34	-1,67
510	6,00	119,37	-56,69	-7,09	-3,54
5	3,00	59,68	-53,03	-6,63	-3,31
5	0,00	0,00	-31,59	-3,95	-1,97

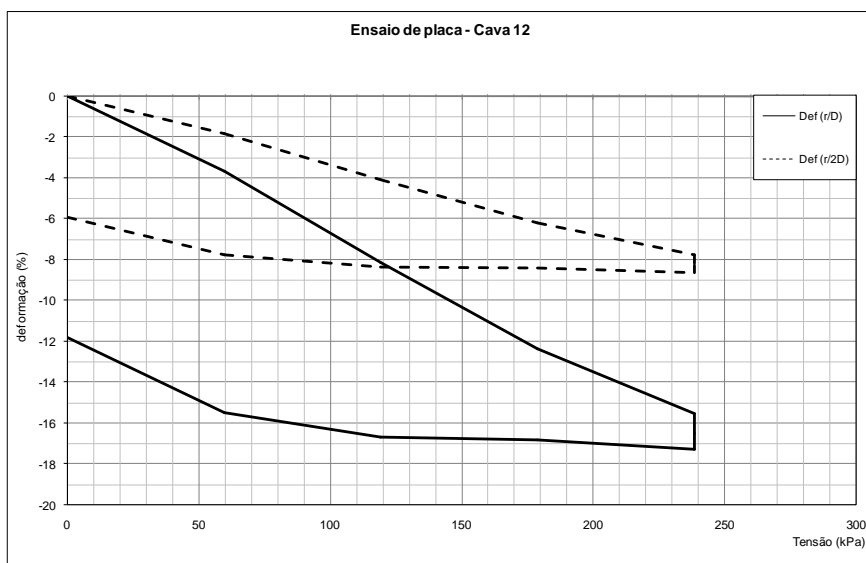


CAVA 12		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
13:00	0,00	0,00
13:02	3,00	-23,45
13:04	3,00	-26,35
13:06	3,00	-26,67
13:10	3,00	-27,61
13:17	3,00	-28,07
13:32	3,00	-29,38
13:40	6,00	-56,66
13:42	6,00	-56,79
13:44	6,00	-58,76
13:48	6,00	-59,81
13:55	6,00	-61,84
14:10	6,00	-64,99
14:18	9,00	-84,10
14:20	9,00	-86,13
14:22	9,00	-88,10
14:26	9,00	-89,47
14:33	9,00	-91,63
14:48	9,00	-98,62
14:58	12,00	-108,87
15:00	12,00	-112,87
15:02	12,00	-114,90
15:06	12,00	-116,07
15:13	12,00	-120,62
15:28	12,00	-124,22
15:45	12,00	-130,23
16:00	12,00	-131,82
16:15	12,00	-136,13
16:30	12,00	-138,10
16:31	9,00	-134,28
16:36	9,00	-134,52
16:37	6,00	-133,55
16:42	6,00	-133,28
16:43	3,00	-124,67
16:48	3,00	-123,73
16:53	0,00	-95,10
16:58	0,00	-94,52

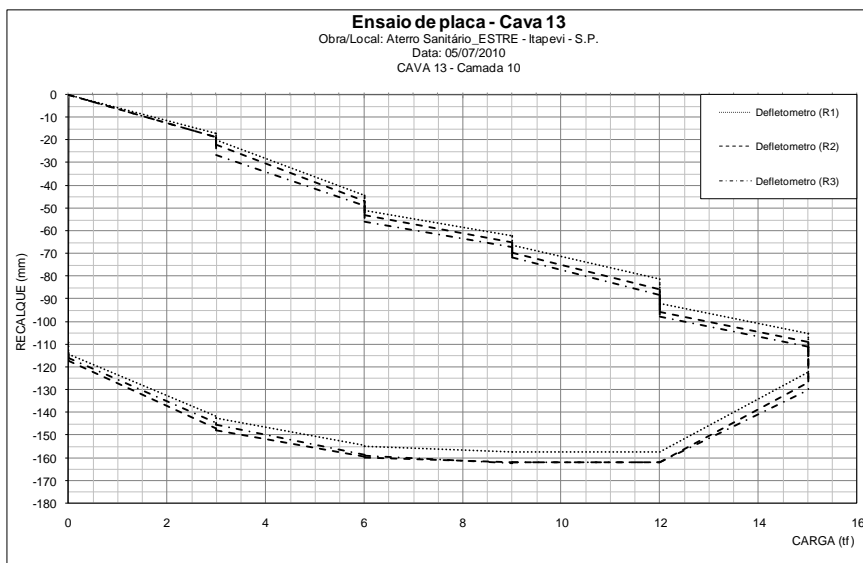


*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (p/D) (%)	Def (p/2D) (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	3,00	59,68	-29,38	-3,67	-1,84
30	6,00	119,37	-64,99	-8,12	-4,06
30	9,00	179,05	-98,62	-12,33	-6,16
90	12,00	238,73	-124,22	-15,53	-7,76
5	9,00	179,05	-134,52	-16,81	-8,41
5	6,00	119,37	-133,28	-16,66	-8,33
5	3,00	59,68	-123,73	-15,47	-7,73
5	0,00	0,00	-94,52	-11,81	-5,91

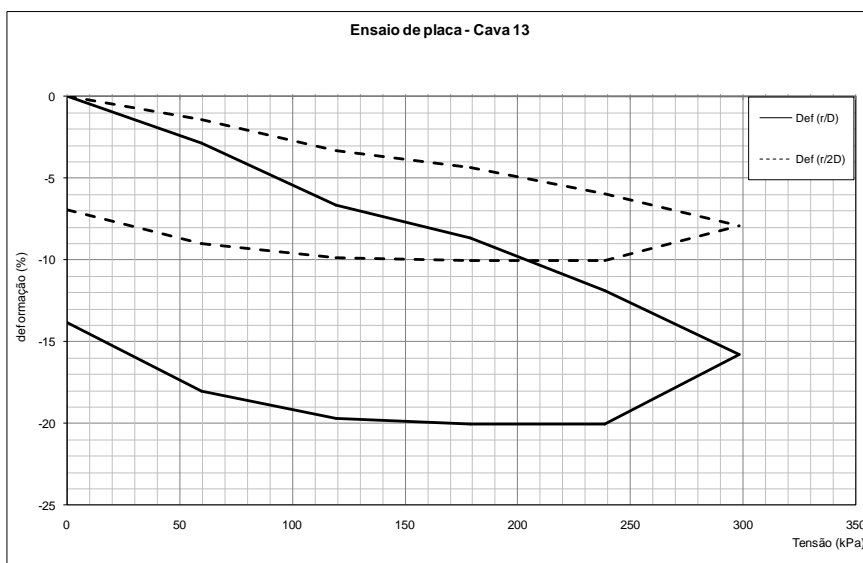


CAVA 13		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
11:58	0,00	0,00
12:00	3,00	-18,03
12:02	3,00	-19,03
12:04	3,00	-19,23
12:08	3,00	-19,87
12:15	3,00	-20,93
12:30	3,00	-22,80
12:34	6,00	-46,62
12:36	6,00	-46,90
12:38	6,00	-47,10
12:42	6,00	-47,51
12:49	6,00	-49,53
13:04	6,00	-53,14
13:12	9,00	-64,72
13:14	9,00	-65,60
13:16	9,00	-66,93
13:20	9,00	-67,47
13:27	9,00	-67,95
13:42	9,00	-69,05
13:50	12,00	-84,93
13:52	12,00	-87,25
13:54	12,00	-88,07
13:58	12,00	-89,83
14:05	12,00	-91,53
14:20	12,00	-95,02
14:28	15,00	-108,22
14:30	15,00	-110,07
14:32	15,00	-110,77
14:38	15,00	-114,90
14:43	15,00	-118,42
14:58	15,00	-126,26
15:20	12,00	-160,17
15:25	12,00	-160,37
15:26	9,00	-160,38
15:31	9,00	-160,42
15:32	6,00	-157,62
15:37	6,00	-157,32
15:38	3,00	-145,18
15:43	3,00	-144,25
15:44	0,00	-115,82
15:49	0,00	-110,75



*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (ρ/D) (%)	Def (ρ/2D) (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	3,00	59,68	-22,80	-2,85	-1,43
30	6,00	119,37	-53,14	-6,64	-3,32
30	9,00	179,05	-69,05	-8,63	-4,32
30	12,00	238,73	-95,02	-11,88	-5,94
30	15,00	298,42	-126,26	-15,78	-7,89
5	12,00	238,73	-160,37	-20,05	-10,02
5	9,00	179,05	-160,42	-20,05	-10,03
5	6,00	119,37	-157,32	-19,66	-9,83
5	3,00	59,68	-144,25	-18,03	-9,02
5	0,00	0,00	-110,75	-13,84	-6,92

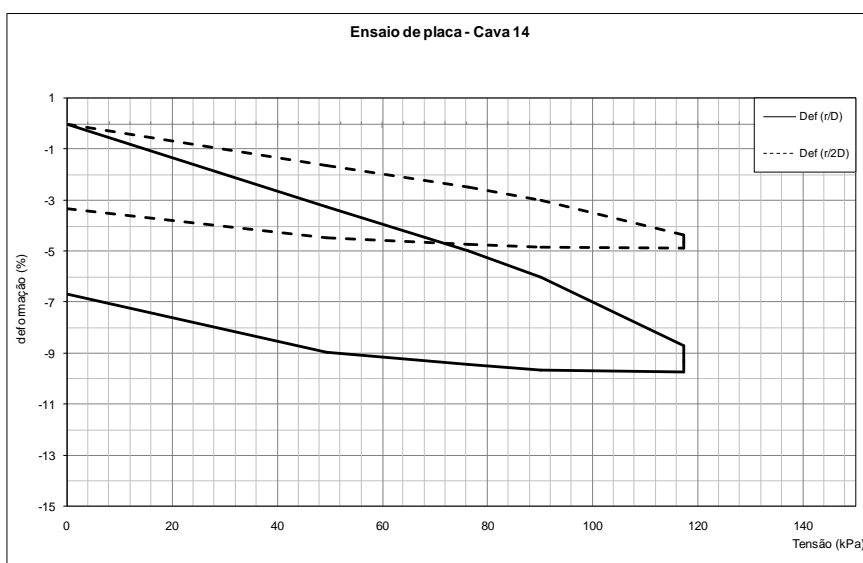


CAVA 14		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
10:05	0,00	0,00
10:10	2,48	-22,40
10:12	2,48	-22,78
10:14	2,48	-23,02
10:18	2,48	-23,10
10:25	2,48	-23,17
10:40	2,48	-24,20
11:10	2,48	-25,22
12:10	2,48	-25,90
12:15	3,84	-33,37
12:17	3,84	-34,23
12:19	3,84	-34,67
12:23	3,84	-35,30
12:30	3,84	-36,07
12:45	3,84	-36,64
13:15	3,84	-38,07
14:15	3,84	-39,67
14:18	3,84	-39,67
14:20	4,53	-41,74
14:22	4,53	-42,22
14:24	4,53	-42,57
14:28	4,53	-42,87
14:35	4,53	-43,17
14:50	4,53	-44,69
15:20	4,53	-46,25
16:20	4,53	-48,05
16:25	5,90	-57,29
16:27	5,90	-58,24
16:29	5,90	-59,34
16:33	5,90	-59,75
16:40	5,90	-61,34
16:55	5,90	-65,22
17:25	5,90	-66,34
18:25	5,90	-69,47
19:25	5,90	-71,98
20:25	5,90	-74,40
21:25	5,90	-76,50
22:25	5,90	-77,92
22:26	4,53	-77,28
22:31	4,53	-77,27
22:32	3,84	-75,58
22:37	3,84	-75,49
22:38	2,48	-72,21
22:43	2,48	-71,55
22:44	0,00	-56,97
22:49	0,00	-53,22

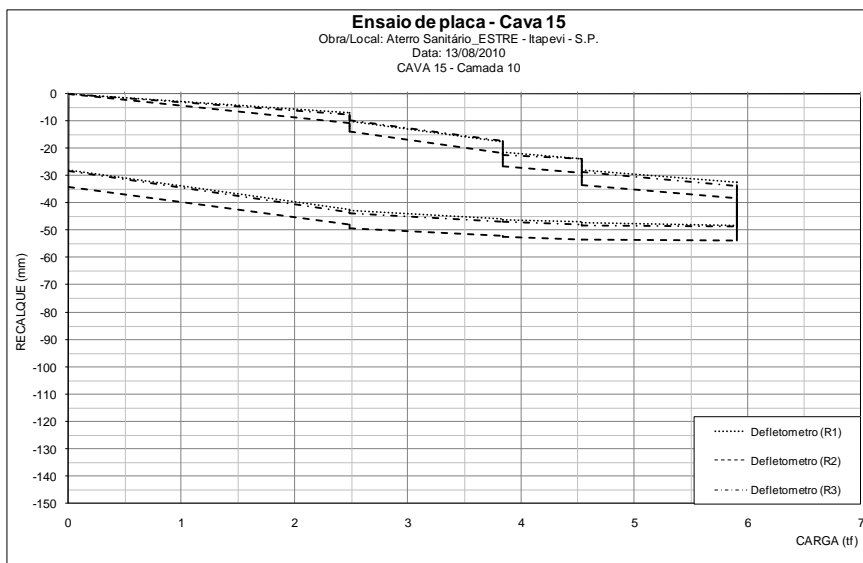


*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (ρ/D) (%)	Def (ρ/2D) (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
120	2,48	49,34	-25,90	-3,24	-1,62
120	3,84	76,39	-39,67	-4,96	-2,48
120	4,53	90,12	-48,05	-6,01	-3,00
360	5,90	117,38	-77,92	-9,74	-4,87
5	4,53	90,12	-77,27	-9,66	-4,83
5	3,84	76,39	-75,49	-9,44	-4,72
5	2,48	49,34	-71,55	-8,94	-4,47
5	0,00	0,00	-53,22	-6,65	-3,33



CAVA 15		
Hora	Carga	Recalque médio
	(tf)	(mm)
10:25	0,00	0,00
10:30	2,48	-8,33
10:32	2,48	-9,13
10:34	2,48	-9,52
10:38	2,48	-9,88
10:45	2,48	-10,33
11:00	2,48	-11,15
11:02	3,84	-18,70
11:04	3,84	-20,43
11:06	3,84	-20,58
11:10	3,84	-21,27
11:17	3,84	-22,33
11:32	3,84	-23,53
11:34	4,53	-25,48
11:36	4,53	-26,27
11:38	4,53	-27,00
11:42	4,53	-27,30
11:49	4,53	-28,33
12:04	4,53	-29,07
12:08	4,53	-30,05
12:10	5,90	-34,78
12:12	5,90	-35,43
12:14	5,90	-36,43
12:18	5,90	-37,02
12:25	5,90	-37,80
12:40	5,90	-38,82
13:10	5,90	-39,65
0:00	5,90	0,00
14:10	5,90	-40,83
0:00	5,90	0,00
15:10	5,90	-42,30
0:00	5,90	0,00
16:10	5,90	-44,18
0:00	5,90	0,00
17:10	5,90	-45,07
0:00	5,90	0,00
18:10	5,90	-46,47
0:00	5,90	0,00
19:10	5,90	-47,15
0:00	5,90	0,00
20:10	5,90	-48,13
0:00	5,90	0,00
21:10	5,90	-49,12
0:00	5,90	0,00
22:10	5,90	-50,17
22:12	4,53	-49,47
22:17	4,53	-49,30
22:18	3,84	-48,34
22:23	3,84	-48,18
22:24	2,48	-45,19
22:29	2,48	-44,53
22:30	0,00	-30,17



*Deslocamentos finais por estágio de carregamento

Estágio* (min)	Carga (tf)	Tensão (kPa)	Recalque médio (mm)	Def (ρ/D) (%)	Def (ρ/2D) (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	2,48	49,34	-11,15	-1,39	-0,70
30	3,84	76,39	-23,53	-2,94	-1,47
30	4,53	90,12	-29,07	-3,63	-1,82
600	5,90	117,38	-40,24	-5,03	-2,52
5	4,53	90,12	-49,30	-6,16	-3,08
5	3,84	76,39	-48,18	-6,02	-3,01
5	2,48	49,34	-44,53	-5,57	-2,78
5	0,00	0,00	-30,17	-3,77	-1,89

