

Leonardo Augusto Lobato Bello

**Desenvolvimento de um pressiômetro de cravação com
aplicação na determinação de propriedades mecânicas
de resíduos sólidos**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor Engenharia Civil.

Orientadores: Tácio Mauro Pereira de Campos
José Tavares Araruna Júnior

Rio de Janeiro, agosto de 2004



Leonardo Augusto Lobato Bello

**Desenvolvimento de um pressômetro de cravação com
aplicação na determinação de propriedades mecânicas
de resíduos sólidos**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Tácio Mauro P. de Campos

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. José Tavares Araruna Júnior

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Pedricto Rocha Filho

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. José Fernando Tomé Jucá

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Roberto Francisco de Azevedo

Universidade Federal de Viçosa

Prof. Gustavo Ferreira Simões

Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de agosto de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Leonardo Augusto Lobato Bello

Graduou-se Engenheiro Civil em 1993 pela Universidade da Amazônia (UNAMA). Concluiu o mestrado em engenharia civil na PUC-Rio em 1997, onde estudou o emprego de micro estacas de bambu e cal na estabilização de encostas. Em 1998 foi convidado para compor o Grupo de Geotecnia Ambiental da UNAMA formado para realizar pesquisas sobre disposição de resíduos sólidos. Coordenou a implantação do Núcleo de Meio Ambiente da UNAMA em 1999 e é professor do CCET/UNAMA desde 1998, ministrando cadeiras do curso de Engenharia Civil.

Ficha Catalográfica

Bello, Leonardo Augusto Lobato

Desenvolvimento de um pressiômetro de cravação com aplicação na determinação de propriedades mecânicas de resíduos sólidos / Leonardo Augusto Lobato Bello; orientadores: Tácio Mauro Pereira de Campos e José Tavares Araruna Junior – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

v. 286 f.::;29,7cm

Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Pressiômetro. 3. Resíduo Sólido. 4. Investigação In Situ. 5. Parâmetros de Deformabilidade. I. Campos, Tácio Mauro Pereira de. II. Araruna Júnior, José Tavares. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

A Deus, por ter me dado saúde e
Aos meus queridos pais pela educação que me proporcionaram.

Agradecimentos

Aos meus pais César e Sônia pelo incessante incentivo e irrestrito apoio durante mais este desafio de minha vida.

À minha querida mulher Sumaya pela sua paciência, apoio, companheirismo, zelo e amor, essenciais para que eu pudesse vencer este desafio. Obrigado por cada momento que tive o privilégio de estar ao seu lado.

Aos meus irmãos, irmã, cunhadas e sobrinha pela amizade, carinho e apoio.

Aos professores e amigos Tácio e Araruna pela séria orientação e irrestrito apoio.

A Universidade da Amazônia pelo apoio institucional pela minha liberação para doutoramento, em particular aos professores Evaristo Resende e Núbia Maciel.

Aos professores do departamento de engenharia civil da PUC-Rio responsáveis pela minha formação na área de Geotecnia.

Aos funcionários do departamento de engenharia civil Ana Roxo, Fátima, William, José, Josué e Amauri pela presteza, amizade e ajuda.

Ao professor Luis Gusmão pela fundamental ajuda na concepção e montagem das partes eletrônicas do pressiómetro.

Ao professor Clarke da Universidade de Newcastle, pela co-orientação e abertura institucional durante a fase de Doutorado Sanduíche na Inglaterra.

Ao professor Jucá da Universidade Federal de Pernambuco pelo apoio institucional e principalmente pelo convênio para as investigações no aterro da Muribeca.

Aos funcionários da prefeitura de Recife, em especial ao gerente e ao sub-gerente do aterro da Muribeca Washington e Aduino e ao engenheiro Eduardo.

Aos técnicos e à engenheira Odete Mariano do ITEP pela presteza, auxílio e dedicação durante a campanha da Muribeca.

Aos amigos do curso de pós-graduação que compartilharam os desafios do dia-a-dia, Ataliba, Ana Julia, Fred, Antônio, Ciro, Anna Paula, Eudes, Cleide, Luciana, Mônica, Patrício, Rafael, dentre tantos outros.

Finalmente, agradecimento importante à FIDESA, à CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro em todas as etapas desta da Tese.

Resumo

Bello, Leonardo A. L.; De Campos, Tácio M. P.; Araruna Junior, José T. **Desenvolvimento de um pressiômetro de cravação com aplicação na determinação de propriedades mecânicas de disposição de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004. 286p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Para compreender as inúmeras variáveis que regem o comportamento tensão-deformação-resistência dos resíduos sólidos urbanos (RSU) muito se têm feito em laboratório na tentativa de modelar o que de fato acontece dentro das células de resíduos, com vários níveis de sucessos e insucessos. Entretanto, dificuldades na obtenção de amostras indeformadas ou na fabricação de amostras representativas da real condição de campo, podem ser fatores limitantes. Por outro lado, as técnicas diretas de investigação de campo trazem consigo o potencial de obter informações reais sobre um meio que é altamente heterogêneo e de comportamento dependente do tempo. Contudo, dadas as dificuldades operacionais e de interpretação estas não têm sido empregadas em RSU de maneira freqüente. Uma destas técnicas é o pressiômetro que, apesar de já consagrada, não tem sido usada em RSU a contento, sendo no Brasil inovadora. Considerando esta lacuna, a presente pesquisa engloba todas as fases de construção de um pressiômetro de cravação (*Full Displacement*) e a sua aplicação na investigação de parâmetros de deformabilidade de resíduos. Um sistema diferenciado de medição de deformações radiais foi projetado para tentar compatibilizar os níveis de deformações necessários e que emprega sensores do tipo Hall. Estes sistemas são colocados ao longo do corpo da sonda em direções ortogonais para avaliar o comportamento da membrana durante a expansão e contabilizar efeitos da heterogeneidade e anisotropia dos RSU. A aplicação do pressiômetro foi realizada no aterro da Muribeca-PE, onde se realizaram ensaios pressiométricos juntamente com sondagens à percussão, ensaios de penetração de cone e análises laboratoriais, cujos resultados foram interpretados com técnicas convencionais fornecendo propriedades mecânicas dos resíduos sólidos.

Palavras-chave

Pressiômetro, resíduo sólido, investigação in situ, parâmetros de deformabilidade.

Abstract

Bello, Leonardo A. L., De Campos, Tácio M. P. (Advisor); Araruna Júnior, José T. (Advisor). **Development of a full displacement pressuremeter towards evaluation of mechanical properties of solid waste.** Rio de Janeiro, 2004. 286p. DSc. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In order to understand the countless variables governing Municipal Solid Waste (MSW) stress-strain-strength behavior, much has been done in laboratory in the attempt of modeling what in fact happens inside the waste cells, with several levels of successes and failures. However, difficulties in obtaining undeformed samples or in preparing samples that represent real field conditions, given the high rank of heterogeneity in MSW landfills, could be limiting factors. On the other hand, direct field investigation techniques bring along great potential in obtaining in situ real information about an environment that is highly heterogeneous and time dependent. Unfortunately, operational and interpretation difficulties are limiting factors to a more common use of such techniques. One of these techniques is the Pressuremeter, which, despite of being already successfully applied in soils, has not been fairly used in MSW, particularly in Brazil which it has not been tested yet. Considering this gap, this research deals with the construction of a new full displacement pressuremeter and its application in MSW investigations. Unlike the prebored and self-boring techniques, the pressuremeter developed here can be directly pushed in the underground. During its construction and assembly stages a system to measure radial displacements was conceived, which makes use of Hall effect sensor in order to measure higher cavity strains. These systems are mounted along the probes' length in orthogonal directions in order to evaluate the membrane behavior during expansion, therefore accounting heterogeneity and anisotropy in MSW landfills. The application of such pressuremeter was carried out in the Muribeca (PE) landfill, where 16 pressuremeter tests were carried out along with standard penetration test, cone penetrometer tests and laboratory analyses, whose results were interpreted with conventional methodologies providing mechanical waste properties.

Key-words

Pressuremeter, solid waste, landfill, in situ investigation, deformability parameters.

Sumário

1	Introdução	26
1.1.	Generalidades	26
1.2.	Objetivos da Pesquisa	29
1.3.	Organização do Trabalho	30
2	Os Pressiômetros	32
2.1.	Definição	32
2.2.	Origem Histórica	33
2.3.	Tipos	34
2.3.1.	Pressiômetros de Pré-Furo	35
2.3.2.	Pressiômetros Autoperfurantes (PAP)	39
2.3.3.	Pressiômetros de Cravação (PC)	42
2.3.3.1.	<i>Full Displacement Pressuremeter</i> – Cone Pressiômetro	43
2.4.	Interpretação de Ensaios Pressiométricos	44
2.4.1.	Evolução Histórica	44
2.4.2.	Teoria da Expansão de Cavidade	50
2.4.2.1.	Modelo Conceitual	50
2.4.2.2.	Distribuição de Tensões	52
2.4.2.3.	Análise da Expansão da Cavidade – regime elástico	54
2.4.3.	Interpretação de Parâmetros	56
2.4.3.1.	Tensão Horizontal (σ_h)	57
2.4.4.	Módulo Cisalhante (G)	60
2.4.4.1.	Módulo Inicial	60
2.4.4.2.	Modulo de Descarregamento – Recarregamento (G_{ur})	61
2.4.4.3.	Resistência ao Cisalhamento Não-Drenada (S_u)	62
2.4.4.4.	Ângulo de Atrito (ϕ)	64
3	Propriedades Mecânicas dos RSU	67
3.1.	Introdução	67

3.2. Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento	68
3.2.1. Investigações de Laboratório	69
3.2.1.1. Resultados de Ensaios de Cisalhamento Direto e Simples	69
3.2.1.2. Resultados de Ensaios Triaxiais e de Compressão não Confinada ⁷⁴	
3.2.2. Ensaios de Campo em RSU	79
3.2.2.1. Resultados de Cisalhamento Direto	79
3.2.2.2. Outras Metodologias	80
3.2.3. Retro-análises de Ensaios com RSU	82
3.3. Resistência a Deformabilidade de RSU	83
3.3.1. Parâmetros de Deformação em RSU por ensaios dinâmicos.	84
3.3.2. Parâmetros de Deformabilidade de RSU por ensaios estáticos.	87
3.3.2.1. Investigações com Pressiômetros em RSU	90
4 Desenvolvimento do Pressiômetro de Cravação	96
4.1. Introdução	96
4.2. Estudos de Projeto do PC-RSU	96
4.2.1. Fundamentos da Instrumentação da Sonda	96
4.2.2. Sensor de Deslocamento Empregado	99
4.2.3. Avaliação de Protótipos para Projeto	101
4.3. Construção das Sondas Pressiométricas	107
4.4. Característica das Demais Partes Constituintes	110
4.4.1. Membrana Semiflexível	110
4.4.2. Sistema de Fixação da Membrana	111
4.4.3. Ponteira Cônica	113
4.4.4. Mangueira e Conexões Hidráulicas de Pressão	113
4.4.5. Separador Elétrico-Gasoso (SEG)	114
4.4.6. Caixa de Controle de Pressões	116
4.4.7. Condicionamento Eletrônico e Aquisição de Dados	118
4.4.8. Fonte de Pressão	120
4.4.9. Dispositivos de Instrumentação da Sonda	121
4.4.9.1. Transdutor de Pressão	121
4.4.9.2. Transdutor de Deslocamento	121
4.4.9.3. Sensor de Temperatura	122

4.4.10. Cabos Elétricos e Convenção de Cores	124
4.5. Procedimentos para Colocação da Membrana	125
4.6. Calibrações das Sondas Pressiométricas	127
4.6.1. Calibração do Sensor de Temperatura	127
4.6.2. Calibração dos Transdutores de Deslocamentos (HET)	129
4.6.2.1. Metodologia	129
4.6.2.2. Ajuste no Programa de Aquisição	131
4.6.2.3. Ajuste no Circuito de Amplificação	132
4.6.2.4. Resultados das Calibrações	134
4.6.2.5. Avaliação do Sistema de Medição de Deslocamento (SMD)	136
4.6.3. Calibração dos Transdutores de Pressão	138
4.6.4. Avaliação da Conectividade de Pressão	139
4.6.5. Calibração da Membrana Semiflexível	141
4.6.5.1. Rigidez da Membrana	141
4.6.5.2. Correção do Afinamento da Parede da Membrana	145
5 Campanha de Investigações em ADRSU	149
5.1. Descrição do Local	149
5.2. Células Experimentais	150
5.2.1. Célula 05	151
5.2.2. Célula 04	152
5.3. Locação dos Pontos	154
5.4. Equipe envolvida nas investigações	155
5.5. Ensaios <i>In Situ</i> Realizados	155
5.5.1. Ensaios Pressiométricos	155
5.5.1.1. Metodologias de Instalação Empregas	155
5.5.1.2. Procedimentos do Ensaio PMT	161
5.5.1.3. Avaliação do Desempenho da Membrana	163
5.5.2. Sondagens à Percussão em RSU (SPT)	166
5.5.2.1. Metodologia de Execução	166
5.5.2.2. Representatividade dos Ensaios SPT em RSU	168
5.5.3. Sondagens de Penetração Estática em RSU (CPT)	169
5.5.3.1. Metodologia de Execução	169

5.5.4. Análises Laboratoriais	170
5.5.4.1. Ensaio de Teor de Umidade ($\%w_r$)	170
5.5.4.2. Ensaio de Teor de Sólidos Voláteis ($\%SV$)	171
5.6. Apresentação de Resultados	171
5.6.1. Resultados de Campo - PMT	171
5.6.2. Resultados de Campo - SPT	172
5.6.3. Resultados de Campo - CPT	172
5.6.4. Resultados de Laboratório – umidade e sólidos voláteis	178
6 Análise e Interpretação dos Resultados	179
6.1. Introdução	179
6.2. Ensaio Pressiométricos	182
6.2.1. Correção das Curvas Pressiométricas	182
6.2.2. Avaliação Qualitativa das Curvas Pressiométricas	198
6.2.3. Influência do Procedimento de Instalação nas Curvas $p \times \varepsilon_c$	202
6.2.4. Determinação do Módulo Cisalhante - G	206
6.2.4.1. Metodologia de Análise	206
6.2.4.2. Variação de G em Profundidade	207
6.2.4.3. Perfil de variação de G com deformação	213
6.2.4.4. Influência da Idade do Resíduo em G	216
6.2.5. Tensão Horizontal (σ_h) e Coeficiente de Empuxo Lateral (K_r)	220
6.2.5.1. Metodologia de Análise	220
6.2.5.2. Variação de σ_h em Profundidade	222
6.2.5.3. Coeficiente de Empuxo Lateral	223
6.3. Ensaio SPT	226
6.4. Ensaio CPT	228
6.5. Ensaio Laboratoriais – Teor de Umidade e de Sólidos Voláteis	230
6.6. Algumas Análises Comparativas entre Ensaio	231
6.6.1. Correlações entre G_{ur} , q_c e N_{spt}	231
6.6.2. Avaliação do efeito de $\%SV$ e $\%w_r$ em G_{ur}	233
7 Conclusões e Sugestões	236
7.1. Desenvolvimento do Equipamento	236

7.2. Aplicação do Equipamento	240
7.3. Análise Crítica Sobre a Interpretação das Curvas	242
7.4. Sugestões de Continuidade da Pesquisa	247
8 Referências Bibliográficas	250
Apêndice I – Avaliação do Desempenho dos SMD	263
Apêndice II – Desenhos da Sonda	267
Anexo I – Laudos de Sondagem SPT	282

Lista de Figuras

Figura 1- Desenho esquemático do conjunto de um pressiômetro de cravação	32
Figura 2 – Fotos de pressiômetros do tipo Ménard e componentes.	37
Figura 3 – Detalhes e fotos do Dilatômetro de Alta Pressão (HPD) da <i>Cambridge Insitu</i> .	37
Figura 4- Detalhes e fotos de alguns PPF da empresa <i>OYO Corporation</i> .	38
Figura 5- Princípio básico do PAP e justificativa para distúrbios mínimos (Clarke, 1995).	40
Figura 6- Detalhes de alguns PAP disponíveis no mercado Inglês.	41
Figura 7 – Foto do PAP da <i>Cambridge Insitu</i> e suas partes constituintes.	42
Figura 8 - Detalhes das partes de um Cone Pressiômetro (Withers <i>et al.</i> 1986).	44
Figura 9- Definição de parâmetro de estado do solo – areias.	48
Figura 10- Definições dos raios empregados nas análises e das trajetórias de tensões em ensaios não drenados: (a) condição <i>in situ</i> ; (b) após instalação; (c) na máxima expansão pressiométrica; (d) durante contração (Houlsby & Withers, 1988).	52
Figura 11- Definições empregadas na análise: (a) expansão de uma cavidade cilíndrica; (b) expansão de um elemento no raio r ; (c) estado de tensões no elemento do raio r .	53
Figura 12- Influência do raio inicial da cavidade e tipo de pressiômetro em σ_h .	57
Figura 13- Ciclos de descarregamento e recarregamento mostrando inclinações usadas para estimar G_u , G_r , E_m - e G_r (inclinação é o dobro do módulo cisalhante): (a) módulos cisalhantes; (b) módulos elásticos.	62
Figura 14- Interpretação de ensaios com PAP para determinação de S_u .	63
Figura 15- Determinação de S_u , σ_h e G segundo Houslby e Withers (1988).	64
Figura 16- Determinação de ϕ' através de ensaios com PAP's em areias densas (Clarke 1997).	64
Figura 17 - Curvas típicas de <i>tensão cisalhante x desl. horizontal</i> obtidas em ensaios de cisalhamento direto (Edinçliler <i>et al.</i> 1996).	73
Figura 18 - Envoltória de resistência obtida por cisalhamento direto (Edinçliler <i>et</i>	

<i>al.</i> 1996).	73
Figura 19 - Parâmetros c e ϕ de ensaios triaxiais com dois diferentes tipos de resíduo (adaptado de Jessberger e Kockel, 1991).	76
Figura 20 - Comportamento tensão deformação com endurecimento observado em ensaios triaxiais (Jessberger e Kockel, 1995).	77
Figura 21- Comportamento tensão-deformação em ensaios triaxiais com RSU (Vilar & Carvalho, 2002).	78
Figura 22 - Resultados de cisalhamento direto no aterro de <i>Doña Juana</i> (Caicedo <i>et al.</i> , 2002b).	80
Figura 23 - Parâmetros oriundos de retro-análises em RSU (Howland & Landva, 1992).	82
Figura 24- Esquema simplificado da técnica de cross-hole.	85
Figura 25 – Faixa de valores de G_0 obtidos a partir de ensaios geofísicos	88
Figura 26- Definições para determinação da pressão de funcionamento	89
Figura 27- Análise comparativa entre alguns módulos de rigidez disponíveis na literatura (Jessberger & Kockel, 1995).	90
Figura 28 - Curva pressiométrica de um PAP em RSU (Dixon <i>et al.</i> , 1999).	93
Figura 29 – Módulo cisalhante de RSU através de PAP, a 1% de deformação da cavidade (Dixon e Jones, 1998)	93
Figura 30 – Análise comparativa entre G disponíveis na literatura (Dixon e Jones, 1998).	94
Figura 32 - Sistemas de medições de deslocamentos em pressiômetros.	98
Figura 33 - Relações tensão-deslocamento em ensaios com RSU.	99
Figura 34 - Fatores intervenientes na ruptura da membrana pressiométrica.	100
Figura 35 - Detalhe e foto do transdutor de efeito Hall utilizado.	101
Figura 36 - Detalhe do sistema de medição existente concebido por Akbar (2001).	102
Figura 37 – Projetos piloto com movimento de imã paralelo ao HET.	102
Figura 38- Respostas típicas do HET para movimentos relativos lineares.	102
Figura 39- Esquema inicial do movimento dos imãs em relação ao HET.	103
Figura 40 – Fotos dos imãs tipo botão usados nos protótipos.	104
Figura 41 - Influência da distância/alinhamento dos imãs nas calibrações do protótipo.	105

Figura 42 - Melhores curvas de calibração do segundo protótipo.	106
Figura 43 - Fotos do protótipo final do SMD com o HET e ímãs mostrados.	106
Figura 44 - Resultados de calibrações com o protótipo final em ciclos de expansão/contração.	107
Figura 45 - Desenhos esquemáticos do corpo central das sondas SP-I e SP-II.	108
Figura 46 - Perfuração de furo longitudinal para dar acesso à fiação e gás pressurizado.	109
Figura 47 - Detalhe da rosca M30x1,5 em cada extremidade das sondas.	109
Figura 48 - Torneamento das cavidades para o SMD.	110
Figura 49 - Detalhes da membrana semi flexível de borracha.	111
Figura 51 – Esquema da fixação da membrana no topo das sondas	113
Figura 52 - Construção da mangueira de alta pressão <i>Euroflow 702</i> .	114
Figura 53 – Detalhes da mangueira de pressão e conectores.	115
Figura 54 - Detalhe do separador elétrico-gasoso.	115
Figura 55 - Detalhe frontal do painel da caixa de controle.	117
Figura 56 - Detalhe das conexões e tubulações internas da caixa de controle.	117
Figura 57 – Fotos da caixa eletrônica de amplificação e aquisição.	118
Figura 58 – Bateria recarregável de 12V usada como fonte de alimentação do circuito.	119
Figura 59 – Detalhes do CI de amplificação da caixa eletrônica.	119
Figura 60 - Conversor analógico-digital de 8 canais usado para aquisição.	120
Figura 61 – Fonte de pressão conectada na caixa de controle de pressões	121
Figura 62 – Detalhes sobre a aplicação do sensor de temperatura LM35.	123
Figura 63 – Fotos do sensor de temperatura e sua localização na sonda.	123
Figura 64 – Esquema da conexão elétrica do sensor de temperatura.	123
Figura 65 - Exemplo ilustrativo dos cabos elétricos utilizados.	124
Figura 66 – Fotos do procedimento de colocação da membrana.	127
Figura 67 – Resultados da calibração do sensor de temperatura da sonda SP1.	128
Figura 68 – Resultados da calibração do sensor de temperatura da sonda SP2.	129
Figura 69 – Dispositivos empregados na calibração dos transdutores de deslocamento.	131
Figura 70 – Exemplo da saída gráfica do programa <i>Picolog</i> durante calibrações do transdutor de deslocamento.	132

Figura 71 – Comparação entre sinais com e sem ajuste de <i>offset</i> para a condição de braço recolhido.	133
Figura 72 – Resultados da calibração dos transdutores de deslocamentos da sonda SP1.	134
Figura 73 – Resultados da calibração dos transdutores de deslocamentos da sonda SP2.	135
Figura 74 – Calibrador <i>Budenberg</i> para transdutores de pressão.	139
Figura 75 – Resultados das calibrações dos transdutores de pressão.	139
Figura 76 – Detalhe da câmara para aferir velocidade transferência de pressão (a); resultados do ensaios (b),(c) e (d)	141
Figura 77 – Exemplo de curva de calibração da rigidez de membranas (Clarke, 1995).	142
Figura 78 – Membrana após ensaio destrutivo.	143
Figura 79 – Estágios de expansão da membrana durante ensaio de calibração da membrana – deslocamento radial (d_r); media de todos os Het's (sonda SP2).	144
Figura 80 – Deslocamento radial de cada Het na expansão da membrana ao ar.	144
Figura 81 – Curva de ajuste do deslocamentos radiais médios no ensaio de expansão da membrana ao ar.	145
Figura 82 – Curvas de ajustes por transdutor: na compressão, na expansão e em todos os pontos	146
Figura 83 – Afinamento da membrana no PC-RSU segundo teoria de Clarke (1995)	148
Figura 84 – Desenho esquemático das células do aterro da Muribeca	150
Figura 85 – Fotos do topo da célula 08: (a) catadores na frente de operação; (b) espalhamento na adjacência com célula 04	151
Figura 86 – Média histórica de precipitação na região do aterro da Muribeca (1971 – 2001) e precipitação nos primeiros meses de 2004 (Instituto Nacional de Meteorologia)	151
Figura 87 – Esquema da disposição das camadas de lixo nas células investigadas.	152
Figura 88 – Fotos da Célula 05 durante a campanha de ensaios.	153
Figura 89 – Fotos da Célula 04 durante a campanha de ensaios.	153

Figura 90 – Planta de locação dos pontos de investigação na Muribeca	154
Figura 91 – Sistema de cravação do PMT usado no aterro da Muribeca: (a) cravador; (b) trado de reação; (c) fixação das reações; (d) trados fixados.	157
Figura 92 – Reação à cravação da sonda SP1 no furo PMT1.	158
Figura 93 – Detalhes da membrana danificada após cravação direta	158
Figura 94 – Resíduo da camada superficial célula 5: (a) retirada manual; (b) in natura; (c) vergalhão no furo; (d) materiais diversos	159
Figura 95 – Trado do SPT alinhado com cravador do PMT/CPT	160
Figura 96 – Detalhe de perfuração da membrana ocorrida durante a expansão no PTM2	162
Figura 97 – Fotos de algumas etapas de instalação anteriores ao ensaio: (a) caixa de controle, circuito e computador montados e acoplados; (b) mangueira passada pelas hastes; (c) sonda montada e conectada.	163
Figura 98 – Fotos da etapa de instalação do pressiômetro: (a) e (b) inserção da sonda; (c) colocação das hastes; (d) cravação do conjunto.	164
Figura 99 – Fotos da etapa de execução do ensaio: (a) aplicação dos acréscimos de pressão; (b) aquisição automática.	164
Figura 100 – Exemplo ilustrativo da saída gráfica durante um ensaio pressiométrico no aterro da Muribeca (PMT3 -6m)	165
Figura 101 – Fotos de danos à membrana: (a) dano superficial na camada de reforço; (b) membrana com ruptura localizada.	166
Figura 102 – Equipe realizando ensaio de SPT em RSU.	167
Figura 103 – Amostragem durante ensaios SPT em RSU: (a) amostrador padrão; (b) abertura do amostrador; (c) material bem recuperado; (d) parcela da amostra representativa.	168
Figura 104 – Entupimento da ponteira com plástico durante ensaio SPT com pouca recuperação de material.	169
Figura 105 – Curvas pressão x deslocamento PMT1– dados brutos , sem correção da rigidez da membrana.	173
Figura 106 – Curvas pressão x deslocamento PMT2– dados brutos , sem correção da rigidez da membrana.	174
Figura 107 – Curvas pressão x deslocamento PMT3– dados brutos , sem correção da rigidez da membrana	175

Figura 108 – Curvas pressão x deslocamento PMT4– dados brutos , sem correção da rigidez da membrana	176
Figura 109 – Resultados de ensaios SPT: (a) Célula 05; (b) Célula 04	177
Figura 110 – Variação de q_c e f_s na célula C5.	177
Figura 111 – Variação de q_c e f_s na Célula 04.	177
Figura 112 – Variação de teor de umidade e sólidos voláteis na célula C5.	178
Figura 113 – Variação de teor de umidade e sólidos voláteis na célula C4.	178
Figura 114 – Histograma de distribuição de q_c nas células C4 e C5.	181
Figura 115 Histograma de distribuição de R_a nas células C4 e C5.	181
Figura 116 – Classificação do RSU do aterro da Muribeca com ábaco de Schmertmann (1978)	181
Figura 132 – Considerações sobre qualidade de ensaios pressiométricos segundo Clarke (1995): (a) efeito da instalação no trecho inicial de curvas com PAP; (b) efeito do tipo de solo nas curvas com PAP; (c) e (d) efeito da instalação no formato geral.	199
Figura 133 – Curva $p \times \varepsilon_c$ ideal de pressiômetros de cravação do tipo FDPM.	204
Figura 134 – Evolução do estado de tensão na parede do pré-furo do PMT.	205
Figura 135 – Exemplo do procedimento para obtenção de G_{ur} e G_r .	206
Figura 136 – Variação do módulo cisalhante com profundidade nas células investigadas.	208
Figura 137 – Avaliação da variação de G com a profundidade na célula C5.	210
Figura 138 – Aumento da rigidez cisalhante do resíduo com o nível de tensões.	212
Figura 139 – Análise comparativa da variação G com profundidade e nível de tensões.	213
Figura 140 – Avaliação da variação do módulo cisalhante do resíduo com o nível de deformação do ciclo: C5 (a) e (b); C4 (c) e (d).	214
Figura 141 – Estimativa da taxa de enchimento das células investigadas.	216
Figura 142 – Efeito da idade do resíduo no módulo cisalhante do ciclo nas células C4 e C5 através de ajuste linear.	217
Figura 143 – Variação de G_{ur}/G_0 em função da idade do RSU.	218
Figura 144 – Comparação entre valores de G_{ur} obtidos com pressiômetro no aterro da Muribeca e adaptado de ensaios de cross-hole no aterro Bandeirantes.	219

Figura 145 – Tensão horizontal obtida nos ensaios pressiométricos.	223
Figura 146 – Tensões verticais e horizontais nas células investigadas.	224
Figura 147 – Variação do coeficiente de empuxo do resíduo (K_r) com a profundidade.	225
Figura 148 – Efeito da idade do resíduo na variação de K_r calculado.	225
Figura 149 – Valores médios de N_{spt} nas células investigadas.	226
Figura 150 – Correlação entre $N_{spt(60\%)}$ e ϕ segundo Décourt (1991) para solos.	227
Figura 151 – Ângulo de atrito do RSU calculado segundo correlação proposta para N_{spt} de solos.	227
Figura 152 – Curvas de ajuste da variação de q_c com profundidade nos ensaios CPT.	229
Figura 153 – Resultados na análise da variação de ϕ em profundidade nos ensaios CPT.	229
Figura 154 – Variação dos teores de umidade e de sólidos voláteis nas células C4 e C5	231
Figura 155 – Correlação entre G_{ur} x q_c nas células C4 e C5.	232
Figura 156 – Correlação entre G_{ur} x N_{spt} nas células C4 e C5.	232
Figura 157 – Correlação entre q_c e N_{spt} nas células C4 e C5.	232
Figura 159 – Influência do %SV na variação dos módulos cisalhantes dos ciclo.	235
Figura 160 – Influência do %SV na variação dos módulos cisalhantes dos ciclo.	235

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Subtipos de pressiômetros de Pré-Furo (Briaud, 1992)	36
Tabela 2 - Principais características de alguns pressiômetros disponíveis na Inglaterra (Mair & Wood, 1987)	36
Tabela 3- Fatores que podem interferir na interpretação de testes pressiométricos em solos (Clarke, 1997).	45
Tabela 4- Exemplos de métodos de interpretação comumente usados em ensaios pressiométricos (Clarke, 1995).	58
Tabela 5 - Terminologia empregada na definição de módulos provenientes de ensaios pressiométricos (Clarke, 1995).	60
Tabela 6 - Valores típicos de ϕ'_{cv} (Robertson & Hughes, 1986).	65
Tabela 7 - Parâmetros de resistência de fardos de RSU compactados e <i>liners</i> (Del Greco & Oggeri, 1994).	71
Tabela 8- Parâmetros de resistência de ensaios triaxiais em resíduo selecionado e moído (adaptado de Jessberger e Kockel, 1991).	76
Tabela 9 - Parâmetros de resistência ajustados a diferentes densidades (adaptado de Vilar e Carvalho, 2002).	79
Tabela 10 - Parâmetros de resistência de aterros na Polônia por investigação direta (Koda, 1997).	81
Tabela 11– Velocidades de propagação e respectivos parâmetros obtidos pela técnica de cross-hole (Sharma <i>et al.</i> 1990).	86
Tabela 12- Velocidades de propagação e respectivos parâmetros obtidos pela técnica de down-hole (Houston <i>et al.</i> 1995).	87
Tabela 13 - Folha característica das mangueiras <i>Euroflow 702</i> .	114
Tabela 14 - Convenção de cores dos fios adotada.	124
Tabela 15 - Convenção de pinos usada na conexão do ADC-16 com a caixa eletrônica.	125
Tabela 16 – Resumo das equações de calibração dos sensores de temperatura.	129
Tabela 17 – Resumo das calibrações dos SMD realizada em novembro/2003.	135
Tabela 18 – Sensibilidade dos transdutores de deslocamento das sondas pressiométricas.	136

Tabela 19 – Resumo das etapas e procedimentos empregados nos ensaios PMT.	162
Tabela 20 – Avaliação da performance do Het 1 – sonda SP1.	264
Tabela 21 – Avaliação da performance do Het 2 – sonda SP1.	264
Tabela 22 – Avaliação da performance do Het 3 – sonda SP1.	265
Tabela 23 – Avaliação da performance do Het 4 – sonda SP1.	265
Tabela 24 – Avaliação da performance do Het 1 – sonda SP2.	266
Tabela 25 – Avaliação da performance do Het 2 – sonda SP2.	266
Tabela 26 – Avaliação da performance do Het 3 – sonda SP2.	266

Lista de Símbolos

$\%SV$ – teor de sólidos voláteis do resíduo

$\%wr$ – teor de umidade do resíduo

Ψ – ângulo de dilatância

ξ – parâmetro de estado (consistência) areia

ε_c – deformação da cavidade

ε_r – deformação radial

δ_r – espessura de um elemento de solo no raio r

δ_y – espessura de um elemento de solo no raio y

ε_θ – deformação circunferencial

£ – libras esterlinas

ADRSU – aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos

B – diâmetro da placa

c – coesão

C4 – célula número 4 do aterro da Muribeca

C5 – célula número 5 do aterro da Muribeca

CI – circuito integrado

CP – cone pressuremeter

CPT – cone penetraion test

CPTU – piezocone penetration test

D – diâmetro

de_0 – diâmetro externo inicial da cavidade da sonda com membrana

de_f – diâmetro externo final da cavidade da sonda com membrana

di_0 – diâmetro interno inicial da cavidade da sonda sem membrana

di_f – diâmetro interno final da cavidade da sonda sem membrana

e – índice de vazio

E_d – módulo de elasticidade dinâmico

E_m – deformação máxima

E_m – módulo de elasticidade de Ménard

em_0 – espessura inicial da parede da membrana

em_f – espessura inicial da parede da membrana

F – faixa de leitura
FDPM – full displacement pressuremeter
 f_s – atrito lateral no ensaio de cone
 FS – full scale
 g – aceleração da gravidade
 G – módulo de cisalhamento
 G_d, G_0 – módulo cisalhante dinâmico ou máximo
 G_m – módulo de cisalhamento de Ménard
GPS – global positioning system
 G_r – módulo de cisalhamento secante
 G_{ur} – módulo de cisalhamento do ciclo
 $H(\%)$ – histerese
HET – hall effect transducer
HPD – high pressure dilatometer
 I_r – índice de rigidez
 I_{RSU} – idade do resíduo
ITEP – instituto tecnológico de Pernambuco
 K_r – coeficiente de empuxo do resíduo
 L – comprimento
 l_0 – comprimento inicial da membrana
 l_f – comprimento final da membrana
LVDT – linear variable differential transducer
MVV – medidor de variação volumétrica
 N_{spt} – índice de resistência à penetração do amostrador do SPT
 p – pressão qualquer
PAP – pressiômetro autoperfurante
PC – pressiômetro de cravação
PEAD – polietileno de alta densidade
 p_F – pressão de escoamento
 p_h – pressão no início do regime elástico
PIP – push in pressuremeter
 p_L – pressão limite do ensaio pressiométrico
PMT – pressuremeter test

PPF – pressiômetro de pré-furo
PVC – polyvinil chlorine
 p_y – pressão do ponto de inflexão da reta virgem
 q_c – resistência de ponta do cone
 $R(\%)$ – repetibilidade
 r, a – raio genérico de uma cavidade
 r_0, a_0 – raio inicial de uma cavidade
 R_a – razão de atrito do ensaio de cone
RSU – resíduos sólidos urbanos
SEG – separador elétrico-gasoso
SMD – sistema de medição de deslocamentos
SP1 – sonda pressiométrica 1
SP2 – sonda pressiométrica 2
 S_u – resistência não drenada
 t – tempo
USB – universal serial bus (porta)
 V – volume
 V_0 – volume inicial
 V_c – velocidade de propagação da onda de compressão
 V_{m0} – volume inicial da parede da membrana
 V_{max} – valor de leitura máxima
 V_{mf} – volume final da parede da membrana
 V_{min} – valor de leitura mínima
 V_s – velocidade de propagação da onda cisalhante
 x_c – leitura média na contração
 x_e – leitura média na expansão
 Δl – variação no comprimento da membrana
 Δp – variação de pressão
 ΔS – recalque da placa
 ΔV – variação de volume
 $\Delta \varepsilon$ – variação de deformação
 ϕ – ângulo de atrito interno
 ϕ_{cv} – ângulo de atrito em volume constante

γ – peso específico genérico

γ_r – peso específico do resíduo

ν – coeficiente de Poisson

ν_d – coeficiente de Poisson dinâmico

ρ - densidade

σ_1 – tensão principal maior

σ_2 – tensão principal menor

σ_h – tensão horizontal

σ_r – tensão radial

σ_v – tensão vertical

σ_θ – tensão circunferencial