

**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 Aauto 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 ( $\sigma_h$ )	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 ( $\phi$ )	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 <sup>74</sup>	
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. Ensaio <i>In Situ</i> Realizados	155
5.5.1. Ensaio 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 Ensaio 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 ( $\sigma_h$ ) e Coeficiente de Empuxo Lateral ( $K_r$ )	220
6.2.5.1. Metodologia de Análise	220
6.2.5.2. Variação de $\sigma_h$ 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 OYO Corporation.	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 $\sigma_h$ .	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 $S_u$ , $\sigma_h$ e $G$ segundo Houslby e Withers (1988).	64
Figura 16- Determinação de $\phi'$ 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 $\phi$ 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– <b>dados brutos</b> , sem correção da rigidez da membrana.	173
Figura 106 – Curvas pressão x deslocamento PMT2– <b>dados brutos</b> , sem correção da rigidez da membrana.	174
Figura 107 – Curvas pressão x deslocamento PMT3– <b>dados brutos</b> , sem correção da rigidez da membrana	175

Figura 108 – Curvas pressão x deslocamento PMT4– <b>dados brutos</b> , 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 $p$ x $\varepsilon_c$ 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 $\phi$ 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 $\phi$ 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 $\phi'_{cv}$ (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

$\Psi$  – ângulo de dilatância

$\xi$  – parâmetro de estado (consistência) areia

$\varepsilon_c$  – deformação da cavidade

$\varepsilon_r$  – deformação radial

$\delta_r$  – espessura de um elemento de solo no raio  $r$

$\delta_y$  – espessura de um elemento de solo no raio  $y$

$\varepsilon_\theta$  – 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  
 $\Delta l$  – variação no comprimento da membrana  
 $\Delta p$  – variação de pressão  
 $\Delta S$  – recalque da placa  
 $\Delta V$  – variação de volume  
 $\Delta \varepsilon$  – variação de deformação  
 $\phi$  – ângulo de atrito interno  
 $\phi_{cv}$  – ângulo de atrito em volume constante

$\gamma$  – peso específico genérico

$\gamma_r$  – peso específico do resíduo

$\nu$  – coeficiente de Poisson

$\nu_d$  – coeficiente de Poisson dinâmico

$\rho$  - densidade

$\sigma_1$  – tensão principal maior

$\sigma_2$  – tensão principal menor

$\sigma_h$  – tensão horizontal

$\sigma_r$  – tensão radial

$\sigma_v$  – tensão vertical

$\sigma_\theta$  – tensão circunferencial

# 1 Introdução

## 1.1. Generalidades

A associação do volume crescente de resíduos provenientes de atividades antrópicas com a diminuição de locais adequados para disposição, seja pela “megalopolização” dos centros urbanos ou por questões de cunho ambiental, constitui um dos principais elementos de agravamento ao problema da disposição ou disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Além disso, a escolha adequada de locais para este fim e a posterior operação correta do aterro de RSU são condições que devem ser seguidas pela administração das cidades. Entretanto, sabe-se que historicamente grande parte das cidades brasileiras acaba inicialmente lançando seus resíduos em áreas escolhidas de modo pouco criterioso ou de maneira desordenada, constituindo os chamados lixões, bota-foras ou vazadouros. Conseqüentemente, em um momento posterior, tem-se que realizar diagnósticos ambientais para avaliar a extensão dos danos e produzir projetos de remediação e controle. Contudo, devido ao acelerado crescimento metropolitano, zonas destinadas para este fim que outrora eram consideradas propícias para tal, vêm-se dentro de um contexto urbano ativo, coexistindo com zonas residenciais, comerciais ou industriais, potencializando o problema com um todo.

A solução para o destino final dos RSU está longe da trivialidade, pois passa pelo engajamento de diversos segmentos da sociedade. Todavia, o que se espera dos órgãos públicos e privados competentes é que desenvolvam sistemas de gerenciamento integrado que compreendam conjuntos de ações de ordem normativas, operacionais, financeiras, de planejamento estratégico e de educação ambiental para que se possa, dentro dos preceitos da legislação ambiental vigente no país, dar destino final aos RSU com o mínimo de impacto ao meio ambiente, ao mais baixo custo e empregando o máximo de tecnologia disponível. Contudo, Jucá (2003) leva a crer que ainda existe um longo caminho a traçar neste contexto, pois as normas técnicas sobre Aterros de Disposição de RSU (ADRSU), apesar de

terem cerca de duas décadas, ainda não incorporam conceitos mais atuais da geotecnia ambiental ou mesmo da biotecnologia.

Do ponto de vista particular da engenharia geotécnica, dos vários desafios enfrentados relacionados à disposição final dos RSU, a concepção de projetos de ADRSU dentro dos preceitos ambientais vigentes pode ser destacado como um dos elementos essenciais para a solução do problema. Além disto, é de igual importância a sua adequada instalação, operação e manutenção ao longo da sua vida útil e que envolve a execução de inúmeras obras geotécnicas como, por exemplo, dispositivos de revestimentos de fundo para impermeabilizações eficientes, sistemas de coleta de líquidos e gases, sistemas de coberturas finais das células, dispositivos de drenagens superficiais; além de análises de estabilidade das células, programas de monitoramento de lixiviados e estimativas de recalques das células, onde se destacam principalmente os processos de biodegradação. Com isto, diversos questionamentos surgem naturalmente. Qual a capacidade efetiva operacional? Qual a vida útil das células do aterro? Elas sofrerão variações volumétricas expressivas? Qual taxa, intensidade e magnitude destas deformações? Qual a metodologia mais eficiente para estimar os recalques durante e após a operação do aterro? Qual o modelo matemático mais adequado? Como obter parâmetros representativos para previsões? O recalque final pode comprometer o projeto de cobertura das células? Pode-se construir sobre o aterro após seu fechamento sem prejuízo estrutural por recalques diferenciais? Enfim, a obtenção das respostas para estas perguntas passa, no mínimo, pelo conhecimento mais aprofundado das características do meio estudado e dos fenômenos que lá ocorrem, principalmente os processos de decomposição dos resíduos no interior das células, pois são estes que determinam o comportamento do aterro. Informações preciosas podem ser obtidas através de campanhas de investigações *in situ* e *ex situ* desde que, neste caso, reproduzam os fenômenos naturais associados aos processos de decomposição nas células dos ADRSU. Todavia, a simples correlação entre a teoria conceitual associada aos RSU e as teorias desenvolvidas ao longo da história da Engenharia Geotécnica não é direta, principalmente por conta do comportamento extremamente peculiar e variado do resíduo, próprio de sua constituição heterogênea. Por conta disto, o comportamento tensão-deformação-resistência do resíduo ainda é alvo de estudos mais aprofundados com vistas à obtenção de parâmetros cada vez mais reais e

confiáveis. Além disto, as características de algumas reações de ordem química e biológica que ocorrem dentro dos ADRSU têm importância direta nos mecanismos de recalques das células de RSU e, por conseguinte, têm sido estudadas cada vez mais profundamente. Desta forma, todos estes aspectos têm induzido ao avanço da chamada Mecânica do Resíduo como ciência destinada ao estudo das propriedades de engenharia dos RSU.

A tentativa de melhor compreender o comportamento tensão-deformação-resistência tem ocorrido tanto em laboratório, quanto em campo, tendo como base as técnicas, equipamentos e metodologias usualmente empregados na geotecnia. Entretanto, se por um lado os ensaios de laboratório constituem um ambiente controlado, estes têm como certa limitação o emprego de amostras deformadas ou remoldadas de resíduo, dificuldades de incorporar os efeitos da degradação biológica que ocorrem na massa de lixo devido à escala de tempo e o efeito da escala física da amostra em relação ao aterro. Sob estes aspectos, a investigação *in situ* é mais indicada, pois agrega as condições físicas, químicas, biológicas e mecânicas naturais de campo, fornecendo resultados certamente mais reais, porém traz também as dificuldades inerentes às campanhas de investigações com RSU. Além disto, Jucá (2003) ressalta, através de uma análise crítica detalhada a respeito de investigações geotécnicas em ADRSU com SPT e CPT, que a correlação entre as informações obtidas com estas técnicas e as características do resíduo como idade e decomposição é tarefa complexa.

Algumas informações oriundas de campanhas de investigação de campo em RSU, na maioria parâmetros mecânicos, têm subsidiado inúmeros modelos matemáticos empregados na previsão do comportamento do material. Contudo, aproximações mais refinadas aos problemas envolveriam o uso de modelos tensão-deformação-resistência mais complexos que incluam, além das parcelas mecânicas, as provenientes da degradação biológica. Este último aspecto tem sido tratado de forma teórica para representar o comportamento mecânico do resíduo (e.g. Simões & de Campos, 2002), independentemente do modelo tensão-deformação adotado. Por outro lado, o uso destes modelos sofre ainda pela falta de uma metodologia de investigação direta, simples, com procedimentos interpretativos padronizados e que possa fornecer parâmetros quantitativos confiáveis de resistência e deformação ao longo do perfil do ADRSU.

Na medida em que se aumentam os conhecimentos sobre os processos de degradação que ocorrem nas células de RSU, pode-se tentar associar os resultados corriqueiros de investigações *in situ* com estes mecanismos condicionantes, de tal forma que se tenham parâmetros mecânicos que já trazem intrinsecamente as parcelas de degradação e, portanto, prontos para emprego direto em modelos mais refinados de comportamento.

Acredita-se que uma técnica que possa servir ao propósito seja a investigação com pressiômetros dada a sua grande versatilidade e aplicabilidade no contexto da geotecnia (e.g. Wroth, 19884; Robertson, 1986; Clarke, 1995) e simplicidade de interpretação (cavidade cilíndrica). Com este tipo de equipamento poder-se-ia obter o perfil de módulo de deformabilidade com profundidade e degradação, desde que se investiguem resíduos com diferentes percentuais de sólidos voláteis, por exemplo. Até o presente momento, a aplicação de pressiômetros em investigações com RSU no Brasil não foi realizada.

## 1.2. Objetivos da Pesquisa

São os seguintes os objetivos gerais desta pesquisa:

- Projetar e montar um pressiômetro de cravação do tipo *Full Displacement*;
- Realizar campanha de investigação em ADRSU com o equipamento desenvolvido em conjunto com outras técnicas *in situ*;
- Determinar propriedades mecânicas de RSU sob a luz das teorias clássicas.

Para alcançar os objetivos gerais têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Conceber um sistema de instrumentação da membrana expansível que tenha baixo custo e possua capacidade de medição maior do que as sondas disponíveis comercialmente;
- Projetar a instrumentação de tal forma que seja capaz de contabilizar o efeito da anisotropia e heterogeneidade do meio investigado.
- Projetar um sistema de controle para ensaios com pressão controlada em material de diferentes características de rigidez;

- Projetar todo o sistema de condicionamento eletrônico de sinais e aquisição automática de dados;
- Avaliar tipos de membranas expansíveis que possam melhor se adaptar ao contexto de investigações com RSU;
- Experimentar e avaliar metodologias de instalação da sonda pressiométrica em células de ADRSU, bem como, procedimentos de ensaios;
- Determinar prioritariamente o módulo de deformabilidade ( $G$ ) e sua variação dentro das células correlacionando-o com outros fatores como idade, decomposição, nível de tensões, etc., realizando análises comparativas, inclusive;
- Secundariamente e quando possível, avaliar demais parâmetros mecânicos geotécnicos;
- Ao final, propor sugestões de melhorias em termos do equipamento, da técnica de instalação, do procedimento de execução e das metodologias de interpretação.

O desenvolvimento de um Pressiômetro de Cravação e sua aplicação em RSU é uma proposta nova no país e que se integra plenamente nos preceitos do grupo de Geotecnologia Ambiental da PUC-Rio, tendo sido financiado pelo PRONEX/CNPq. Para este fim, foram estabelecidas parcerias com a universidade de *Newcastle Upon Tyne*, na Inglaterra, onde há um centro especializado no desenvolvimento e aplicação de pressiômetros, e com a UFPE que tem realizado extensas campanhas de investigações em ADRSU no país.

### **1.3. Organização do Trabalho**

O Capítulo 2 faz parte da revisão bibliográfica e aborda a temática dos pressiômetros de uma forma geral, apresentando algumas definições e informações detalhadas sobre os diversos tipos de sondas disponíveis atualmente.

A revisão bibliográfica continua no Capítulo 3, que traz considerações acerca das teorias clássicas empregadas na determinação de parâmetros de resistência e deformação em aterros de RSU.

As fases do desenvolvimento do pressiómetro e suas características fundamentais fundamentam o Capítulo 4, onde se encontram as atividades desenvolvidas na Inglaterra, durante o programa de Doutorado Sanduíche, bem como etapas posteriores realizadas no Brasil, envolvendo montagem, testes e calibrações.

O Capítulo 5 enfoca a aplicação prática do equipamento em uma de investigação realizada no aterro da Muribeca em Pernambuco, apresentando resultados brutos de campo.

Em seqüência, no Capítulo 6 são realizadas as interpretações dos dados de campo e análises comparativas com resultados da literatura.

Finalmente no Capítulo 7 constam as análises críticas conclusivas, bem como os comentários sobre sugestões de continuidade desta pesquisa.

Em seqüência estão as Referências Bibliográficas e o Apêndice com os projetos das sondas, tabelas de avaliação de eficiência de sensores, laudos de sondagens.

## 2 Os Pressiômetros

### 2.1. Definição

Clarke (1995) define o pressiômetro como sendo basicamente uma sonda com forma cilíndrica, projetada para aplicar de maneira controlada pressões nas paredes de um furo de sondagem por meio da expansão de uma membrana. A resposta do solo a esta expansão, ou seja, a relação entre pressões aplicadas no solo e deformações observadas, pode ser interpretada fornecendo propriedades do solo e parâmetros de projeto. A Figura 1 ilustra o pressiômetro já instalado no subsolo por meio de cravação, porém podendo ser por autoperfuração ou colocação em um pré-furo. As hastes de cravação levam a sonda até a profundidade desejada e cabos e mangueiras realizam a conexão da mesma com a unidade de controle na superfície, que é usualmente constituída por reguladores, fonte de pressão e um sistema de aquisição de dados que controlam a expansão.

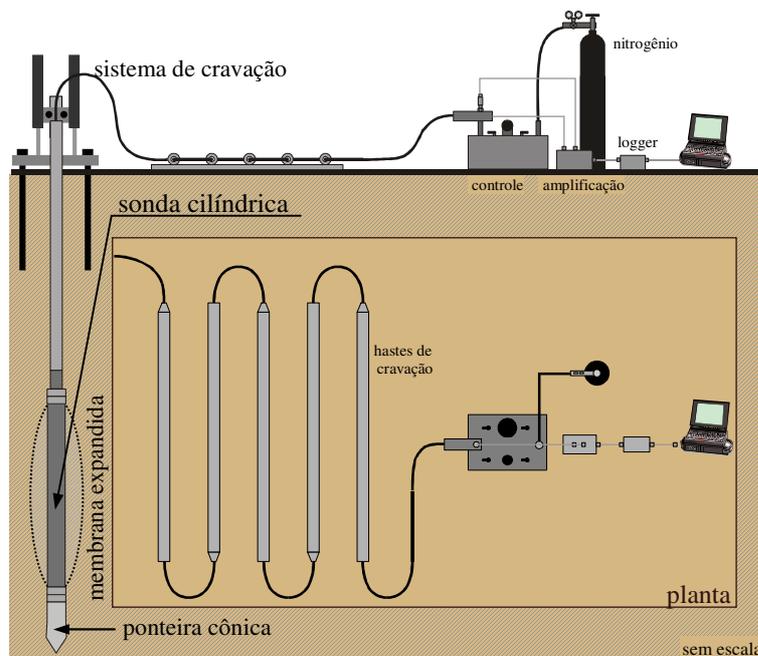


Figura 1- Desenho esquemático do conjunto de um pressiômetro de cravação

A pressão ao longo da seção ensaiada, bem como a expansão radial da membrana, são continuamente monitoradas pela unidade de controle e aquisição na superfície. Há diferentes tipos de testes, porém em todos eles pequenos acréscimos de pressão ( $\Delta p$ ) são aplicados no interior da sonda provocando expansão de uma membrana. A medição dos deslocamentos radiais ( $\varepsilon_r$ ) desta membrana ou variação volumétrica da cavidade ( $\Delta V/V$ ), fornece a resposta do solo à dada variação de pressão. Esta resposta configura graficamente uma relação  $\Delta p$  x  $\varepsilon_r$ , conhecida como curva pressiométrica ou curva-resposta do solo. Ensaio pressiométricos e de placas são os únicos ensaios *in situ* que fornecem valores diretos de tensão horizontal, rigidez e resistência do solo.

## 2.2. Origem Histórica

A primeira evidência documental relacionada ao tema em questão é da década de 30 quando Kogler (1933), na Alemanha, recebeu os créditos iniciais por ter desenvolvido um dos primeiros pressiômetros de pré-furo que se tem notícia. Todavia, o seu trabalho não teve continuidade. Entretanto, de acordo com Clarke (1996), a primeira aplicação comercial desta ferramenta somente ocorreu na década de 50, nos EUA e Japão. Em 1954, paralelamente, Fang, na universidade de Purdue, e Ménard, na universidade de Illinois, foram os pioneiros no desenvolvimento do equipamento que viria a ser a base para os pressiômetros modernos. Segundo Briaud (1992), no ano seguinte Ménard desenvolveu e patenteou o instrumento que se tornou conhecido como pressiômetro de Ménard. A sua primeira aplicação (Ménard, 1957a, 1957b) ocorreu na cidade de Chicago, EUA, com o intuito de obter propriedades de deformabilidade do solo para fins de projeto de fundações. Nos anos seguintes, a compilação de quatro anos de experiência com o uso do pressiômetro culminou na publicação dos primeiros ábacos e equações que relacionaram diretamente resultados de ensaios pressiométricos com recalques de fundações (e.g. Ménard, 1963).

Desde então, foram inúmeros e significativos os avanços em termos de equipamentos, metodologia de interpretação e aplicação prática do ensaio pressiométrico, o que o tornaram um método de investigação geotécnica rotineiro em alguns países. Conseqüentemente, grupos especializados no desenvolvimento

e comercialização de novos equipamentos foram constituídos ao redor do mundo, incluindo *Cambridge In Situ*, *Fugro B. V.*, *Hogentogler*, *Roctest*, *Texas A & M University* e a Universidade de *British Columbia*, por exemplo. No Brasil, o enfoque tem sido dado mais à aplicação e interpretação de parâmetros de solos (argilas moles, solos residuais, tropicais e não saturados) do que para o desenvolvimento de novos equipamentos. Algumas universidades têm se dedicado em pesquisas acerca do desenvolvimento e aplicação desta técnica, como a UFRGS, PUC-RIO e USP.

### **2.3. Tipos**

Ao longo da evolução histórica do ensaio pressiométrico novos equipamentos e técnicas têm surgido com o intuito de minimizar os efeitos de amolgamento no solo durante a instalação, fornecendo resultados mais próximos da realidade, e de ampliar o horizonte de aplicação da técnica para outros tipos de solos e rochas. De uma forma geral, diversos autores (e.g. Mair & Wood, 1987; Briaud, 1992; Clarke, 1995; Schnaid, 2000) agrupam as sondas pressiométricas disponíveis, o tipo de metodologia empregada para a sua instalação e, em segundo plano, em função da maneira com que a sonda é instrumentada, recebendo a seguinte classificação:

- Pressiômetro de Pré-Furo ou em Perfuração (PPF);
- Pressiômetro Autoperfurante (PAP);
- Pressiômetro de Cravação ou de Inserção Direta (PC).

Segundo Clarke (1996) apesar de algumas sondas pressiométricas compartilharem aspectos similares, elas podem diferir significativamente em detalhe. Um mesmo tipo de pressiômetro pode apresentar deflexões máximas de 40mm enquanto que outros 85mm. Entretanto, a relação comprimento-diâmetro (L/D) da seção teste é usualmente maior que cinco unidades, chegando até a 10. O conhecimento destas dimensões é importante, pois governam o diâmetro do pré-furo e o diâmetro e comprimento da cavidade ensaiada. Esta, por sua vez, é ensaiada por intermédio da expansão de membranas semi-ríidas constituídas com

borrachas nitrílica ou naturais, que são vestidas no corpo da sonda e fixadas em suas extremidades, podendo ser protegidas por um sistema conhecido como “lanternas chinesas”, que são construídas com lâminas delgadas e flexíveis de aço, sobrepostas sobre a membrana (Cunha, 1996), ou, ainda, reforçadas com outro material como fibras de nylon e tecido (Akbar, 2001) para garantia da integridade das mesmas durante a instalação e teste. Estas membranas são infladas por um fluido pressurizado proveniente da superfície, sendo nitrogênio o gás mais comumente empregado, e as deformações monitoradas por meio de transdutores de deslocamentos especiais (radiais ou diametrais) ou por medidores de variação volumétrica (MVV). Atualmente, na Inglaterra o único pressiômetro comercialmente em uso baseado em medição volumétrica é o de Ménard.

### **2.3.1. Pressiômetros de Pré-Furo**

Conhecido também pela sigla PBPM, da língua inglesa “Prebored Pressuremeter”, foi desenvolvido para ser inserido em um furo de sondagem previamente executado e tem como exemplo clássico o pressiômetro original de Ménard. Essencialmente, Mair & Wood (1987) indicam a existência de quatro modelos de PPF disponíveis no mercado, cujas diferenças básicas estão na metodologia de aplicação da pressão entre a membrana e a sonda e no método de medição da resposta do solo. A aplicação das pressões é realizada por meio de fluidos como água, óleo ou gás, normalmente com auxílio de garrafas pressurizadas, que são levadas ao campo, ou ainda mecanicamente. Por outro lado, a resposta do solo para um dado acréscimo de pressão é determinada através da obtenção de variações volumétricas do fluido (MVV) ou pela medição direta de deslocamentos radiais da membrana (transdutores de deslocamentos). Briaud (1992) apresenta (Tabela 3) uma distinção simplificada dos tipos de pressiômetros encontrados, enquanto que Mair & Wood (1987) sumarizam (Tabela 4) as principais características de alguns pressiômetros disponíveis no Reino Unido. Todavia, qualquer que seja a subdivisão adotada, as diferenças conceituais giram em torno de três aspectos:

- Número de células na sonda;
- Método de aplicação das pressões;
- Sistema de medição.

Tabela 1 – Subtipos de pressiômetros de Pré-Furo (Briaud, 1992)

Tipos	Nº Células	Fluido na Célula		Fonte de Pressão	Sistema de Medição
		Principal	Secundária		
1	3	Água	Gás	Nitrogênio Comprimido	MVV
2	1	Água	-	Nitrogênio Comprimido	MVV
3	1	Água	-	Mecânica – Pistões	MVV
4	1	Gás	-	Nitrogênio Comprimido	Transdutores

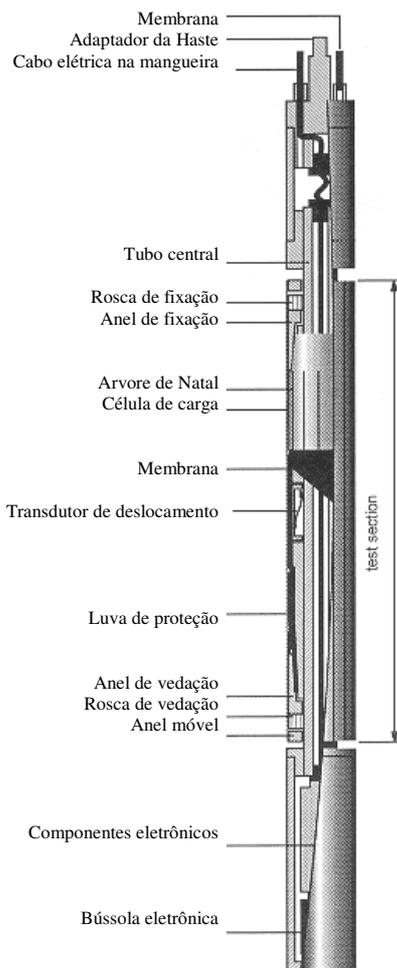
Tabela 2 - Principais características de alguns pressiômetros disponíveis na Inglaterra (Mair &amp; Wood, 1987)

Equipamento	Método de Instalação	Pressão	Deformação	Press Máx (MN/m <sup>2</sup> )	Defor Máx (%)	Controle do Ensaio	D (mm)	L/D
Pressiômetro de Ménard	PPF	Água/manômetro na superfície	Indireta – $\Delta V$	10	27	Pressão	74	6,5
Elastmeter 100 (Oyo)	PPF	Água, óleo ou gás/manômetro na superfície	LVDT – média entre dois pontos	10	10	Pressão	70	7,4
Camkometer (Cambridge Insitu)	PAP	Gás/transdutor na sonda	3 strain gauges independentes	4	-	Pressão ou deforma	82	6,3
Dilatômetro de Alta Pressão (Cambridge Insitu)	PPF	Óleo/transdutor na sonda	6 strain gauges independentes	20	25	Pressão	74	6,1
Building Research Establishment	PC	Óleo/transdutor na sonda.	Indireta – $\Delta V$	3.5	10	Pressão	78	4,2

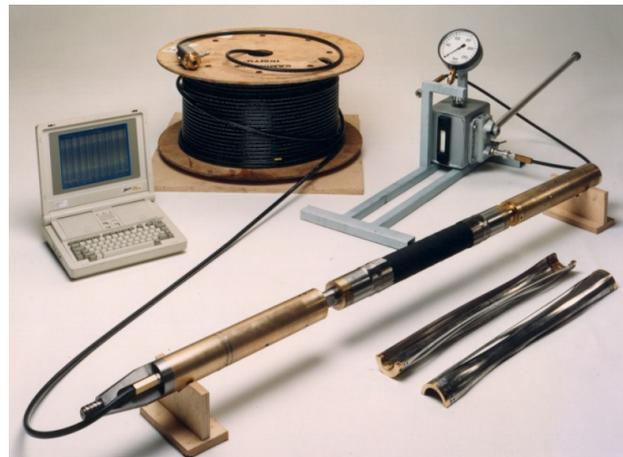
O pressiômetro de Ménard (Figura 2) é o exemplo mais clássico de PPF. A sonda é constituída por três células: uma central de medição, que é preenchida com água proveniente do medidor de variação volumétrica na superfície, e posicionada entre outras duas células de proteção, que são preenchidas com gás comprimido. As três células são independentes e construídas com membranas de borracha que se expandem e transmitem pressões às paredes do furo. As células de proteção que a célula central apresente deformações predominantemente radiais devido às restrições impostas pelas células de proteção no topo e base, ou seja, mantém um estado de deformação plana na região central da sonda.



Figura 2 – Fotos de pressiômetros do tipo Ménéard e componentes.



(a) *High Pressure Dilatometer (HPD) – Cambridge Insitu*



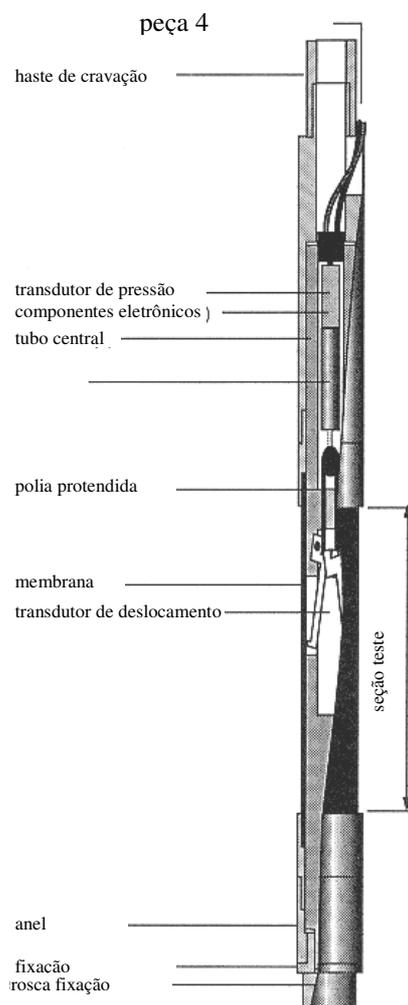
(b) *HPD Cambridge Insitu (73 mm)*



(c) *HPD Cambridge Insitu (95 mm)*

Figura 3 – Detalhes e fotos do Dilatômetro de Alta Pressão (HPD) da *Cambridge Insitu*.

O Dilatômetro de Alta Pressão (*High Pressure Dilatometer – HPD*) desenvolvido por Hughes & Ervin (1980) ilustrado na Figura 3 e os *Elastmeter* e LLM da companhia Japonesa OYO (Figura 4), são outros exemplos clássicos de PPF, ambos com medições de deslocamentos radiais da membrana. Nos dois primeiros, braços móveis acompanham o movimento da membrana, mais espessa para uso em rochas, e acionam uma lâmina de aço mola instrumentada com *strain gauges* (*fellers*), enquanto que no terceiro, três pares de placas movimentadas por molas, acompanham o movimento da membrana que é protegida por meio de Lanternas Chinesas (Cunha, 1996). Ambas as sondas possuem célula única.

(a) *Elastmeter 100*(b) *Elastmeter 200*

(c) LLT-M

Figura 4- Detalhes e fotos de alguns PPF da empresa OYO Corporation.

### 2.3.2. Pressiômetros Autoperfurantes (PAP)

Ménard em 1957 fez uso da teoria da expansão de cavidade para derivar parâmetros advindos de ensaios PPF e logo percebeu que o processo de instalação causava grandes mudanças nas condições *in situ* do solo e, portanto, impossibilitava a obtenção da curva tensão-deformação real. Era necessário, então, empregar-se um equipamento que minimizasse o efeito deste distúrbio. Esta limitação foi logo contornada pela proposta do uso de pressiômetros autoperfurantes (Jézequel *et al.*, 1968) na obtenção das referidas curvas. Posteriormente, a sugestão de Wroth & Hughes (1973) em medir a tensão *in situ* durante os ensaios, visto que o comportamento do solo é proporcional a este estado, levou ao desenvolvimento do *Camkometer*, um PAP com célula de carga embutida, que evoluiu posteriormente para o pressiômetro autoperfurante da universidade de Cambridge, amplamente utilizado nos dias atuais.

O princípio por trás do uso de PAP está na instalação da sonda com o mínimo de distúrbios no solo. Para tentar explicar este princípio, seja o caso mostrado na Figura 5a, onde um tubo de parede fina é inserido no subsolo. Neste caso, à medida que o material dentro do tubo é retirado, a tensão vertical total na base do tubo torna-se nula, modificando o estado de tensões local. Este alívio de tensão, por sua vez, gera deformações verticais expansivas que são acompanhadas por deformações horizontais, causando, igualmente, alívio nas tensões horizontais. Por fim, as condições naturais do solo são modificadas.

Por outro lado, o caso da Figura 5b, onde um volume cilíndrico sólido é empurrado no solo, causa um considerável aumento nas tensões verticais, levando à compressão do material na base do sólido. Similarmente ao caso anterior, as tensões horizontais são modificadas e o estado natural do solo é alterado acentuadamente.

Todavia, deve existir um ponto intermediário entre as configurações extremas das Figuras 5a e 5b onde não ocorre mudança no estado de tensões na face da sonda, isto é, há um equilíbrio de forças compressivas e expansivas de tal sorte que a condição *in situ* é preservada. Este é exatamente o princípio dos PAP's (Figura 5c).

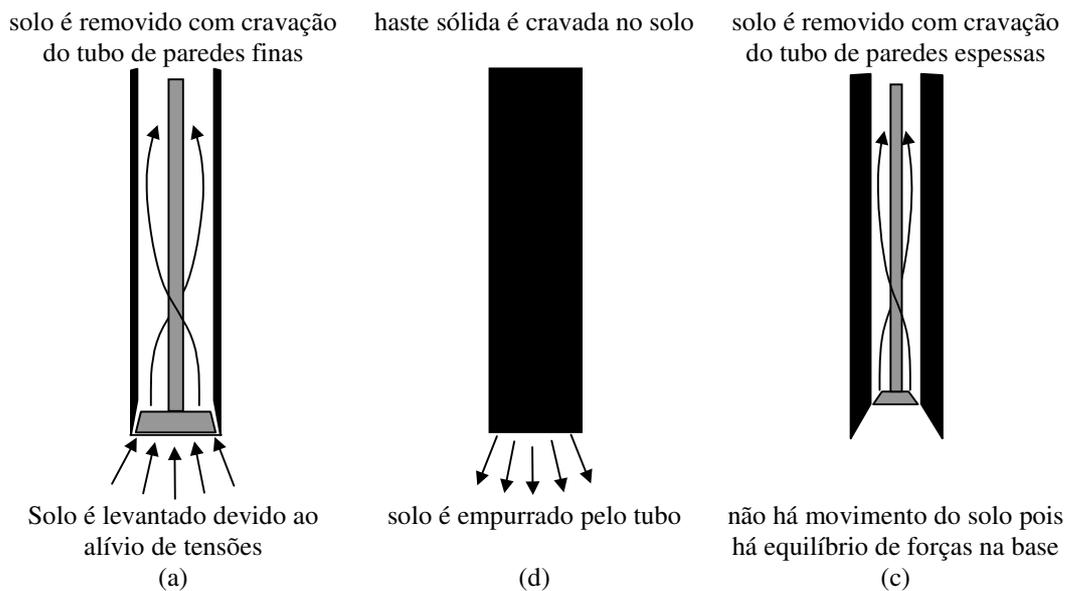


Figura 5- Princípio básico do PAP e justificativa para distúrbios mínimos (Clarke, 1995).

Segundo Clarke (1995) o tubo no núcleo central dos PAP's é oco para permitir a passagem do fluido de sondagem e as hastes internas. É este tubo central que transmite os esforços verticais à sonda para que esta vença o atrito lateral no solo e, ainda, produz a sobrecarga necessária para o avanço da sondagem.

Na base chanfrada internamente da sonda está uma sapata rotativa autoportante, que é posicionada por meio de hastes. Estas hastes são rotacionadas por um motor que pode estar localizado na cabeça de perfuração, acima da seção teste ou na superfície, dependendo do tipo de sonda usada.

A sonda é conectada à superfície por hastes fixas de sondagem que são usadas para posicioná-la em profundidade e empurrá-la no solo à medida que se avança com a escavação. O fluido de lavagem é bombeado através das hastes de rotação ou através de mangueiras hidráulicas que vão até a sapata cortante, passando internamente pelas hastes principais de sondagem. O refluxo, então, traz as partículas de solo e a sonda avança até a profundidade de ensaio.

A Figura 6a apresenta detalhes do PAP de Cambridge e suas características de projeto e a Figura 7 uma foto do conjunto. A sonda original construída na década de 70 possui aproximadamente 74mm de diâmetro, comprimento total de um metro e seção expansível de 500mm. As medições são feitas por meio de transdutores de deslocamentos espaçados em 120°, posicionados no centro da

seção expansível. Maiores detalhes e modificações realizadas posteriormente na sonda são descritos por Wroth & Hughes (1973), Windle & Wroth (1975), Fahey *et al.* (1988), Fahey & Jewell (1990), Benoit *et al.* (1990) e Clarke (1995). Além do *Camkometer*, Clarke & Allan (1989) apresentam uma versão de um PAP, baseado nos princípios e conceitos de projeto do pressiômetro de *Cambridge*, que tem sua utilização voltada para rochas brandas, Figura 6b.

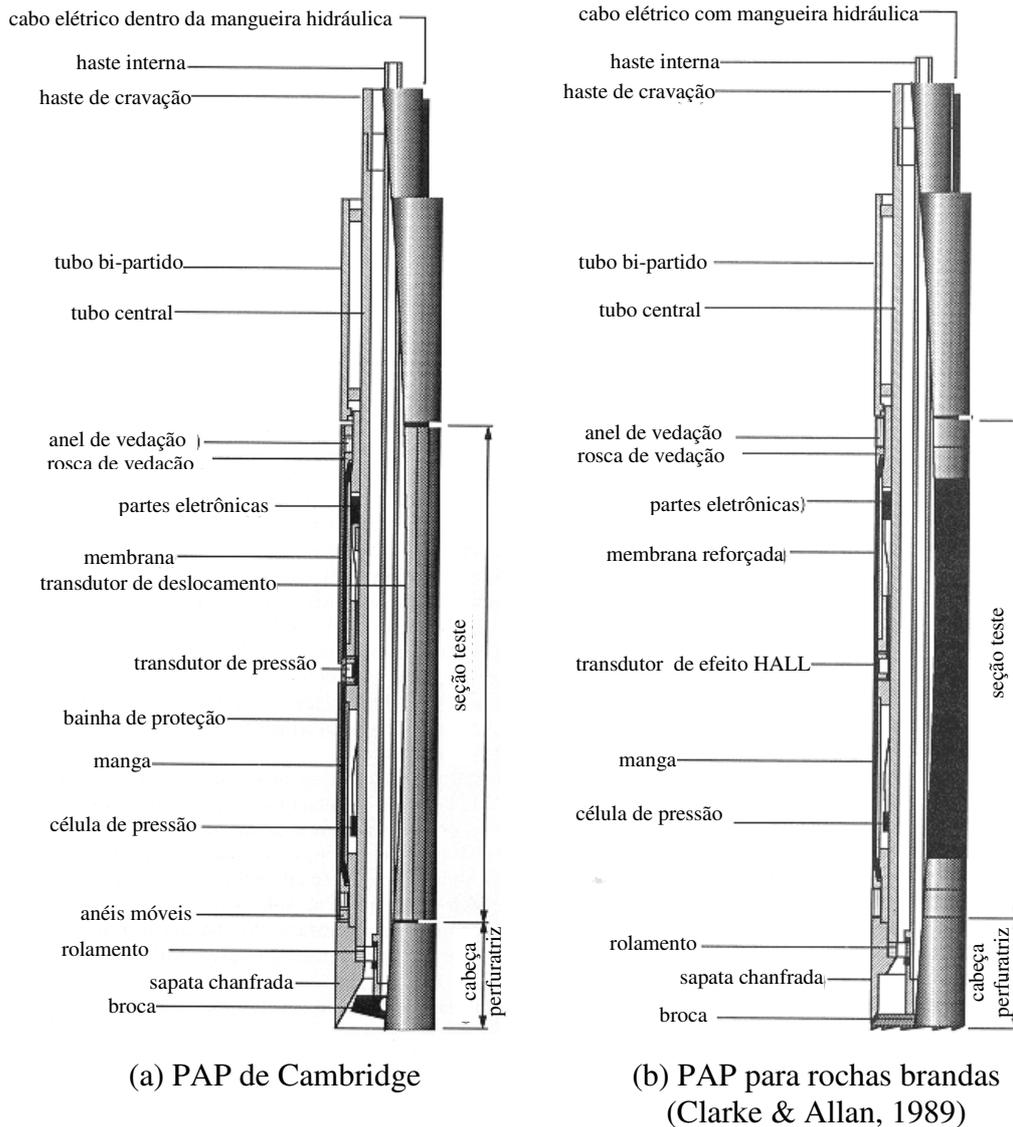


Figura 6- Detalhes de alguns PAP disponíveis no mercado Inglês.



Figura 7 – Foto do PAP da *Cambridge Insitu* e suas partes constituintes.

### 2.3.3. Pressiômetros de Cravação (PC)

De acordo com Clarke (1995), os pressiômetros que são empurrados diretamente no solo são conhecidos como Pressiômetros de Cravação (PC) ou, como na língua Inglesa, *Push-In Pressuremeters* (PIP). Quando o solo é totalmente deslocado radialmente durante a cravação, estes recebem a denominação de Pressiômetros de Deslocamento Total (PDT) (do Inglês *Full Displacement Pressuremeter* - FDPM), sendo a sua versão atualmente mais conhecida o Cone Pressiômetro (CP). No caso dos FDPM a força necessária para cravação é função da resistência de ponta e atrito no anel espaçador acima da ponteira e podem ser instalados desde a superfície do solo ou a partir da base de um furo prévio. Similar aos ensaios de penetração com cones estáticos, um fator limitante é o sistema de reação disponível.

Os primeiros PC's desenvolvidos (Jézequel *et al.*, 1982; Reid *et al.*, 1982) tiveram o seu emprego exclusivo em investigações *offshore*. Posteriormente Huang *et al.* (1988), desenvolveram outro PC destinado ao uso *onshore*. Em ambos os casos, um tubo de paredes espessas era empurrado diretamente no solo, normalmente em profundidade na base de um furo, e o solo que adentrava o interior do tubo era retirado juntamente com o sistema após o ensaio. A membrana era inflada por óleo e a pressão e a deformação volumétrica medida.

### 2.3.3.1.

#### **Full Displacement Pressuremeter – Cone Pressiômetro**

A idéia de incorporar um módulo pressiométrico ao fuste de um CPTU foi introduzida no início da década de 80 na França e Canadá. Todavia, segundo Akbar (2001), estes equipamentos por possuírem diâmetros elevados, requeriam sistemas de cravação especiais e foram logo substituídos por sondas com diâmetros inferiores. O primeiro pressiômetro do gênero foi desenvolvido por Withers *et al.* (1986), o qual possuía na sua ponta um cone sólido de 60° e 15cm<sup>2</sup> de área, 44mm de diâmetro (D) e 1m de comprimento, dos quais 450mm eram referentes ao comprimento teste (L), o que produzia uma relação  $L/D \cong 10$ . A medição das deformações radiais da membrana expansiva ocorria no plano central da sonda, em três pontos equidistantes em 120°. O instrumento era inflado por meio de gás nitrogênio ou por óleo quando o uso era *offshore* (Withers *et al.*, 1986). O equipamento atual da empresa *Fugro* (Zuidberg & Post, 1995) foi modificado para permitir montagem mais simples e melhor controle do ensaio, porém, o projeto básico permanece inalterado. A Figura 8 apresenta detalhes deste cone pressiômetro.

Os Cone Pressiômetros são usualmente instalados no subsolo empregando-se um caminhão como reação e idealmente a uma taxa constante de 20mm/s para permitir a aquisição de dados oriundos da ponta cônica e requeridos em correlações empíricas. Durante a cravação o procedimento é interrompido em profundidades pré-estabelecidas e o ensaio pressiométrico é realizado. Como as dimensões do CP são geralmente maiores do que o cone convencional, a força requerida para instalação é também maior e, portanto, o sistema de reação é geralmente um fator limitante no ensaio.

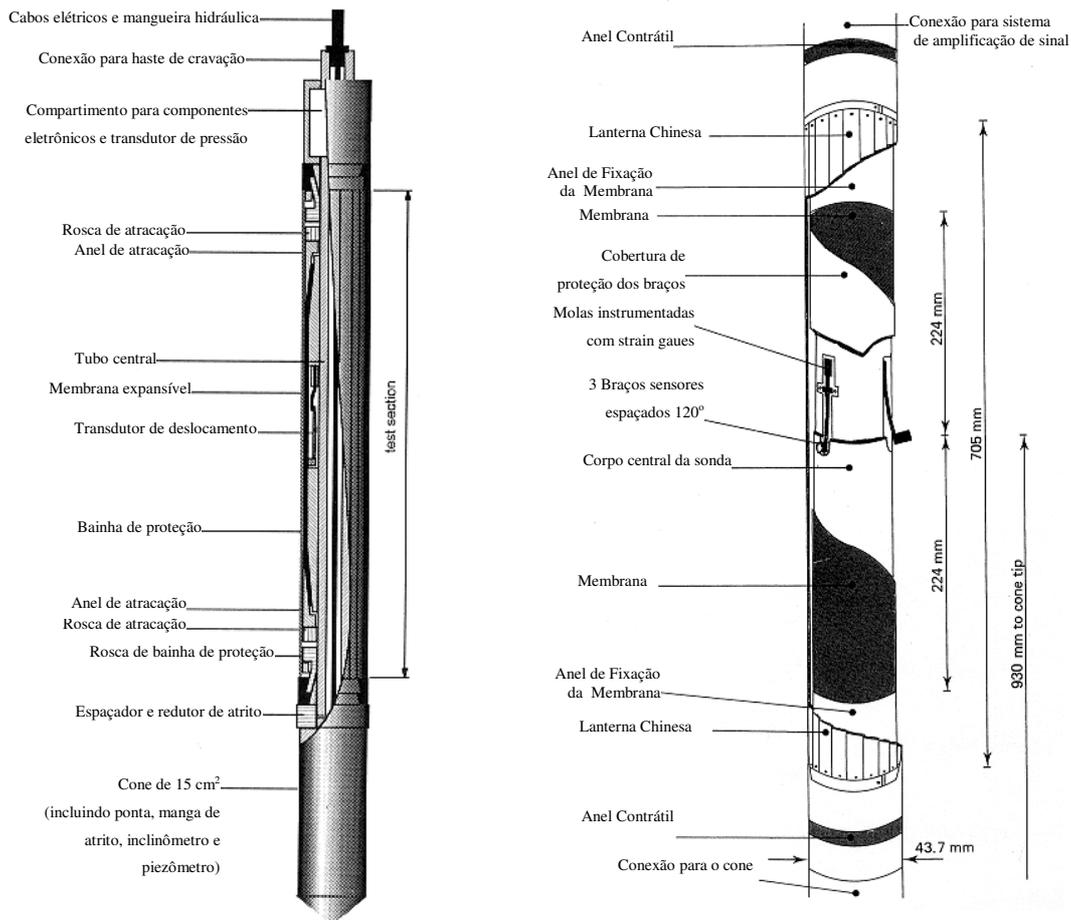


Figura 8 - Detalhes das partes de um Cone Pressiômetro (Withers *et al.* 1986).

## 2.4. Interpretação de Ensaios Pressiométricos

### 2.4.1. Evolução Histórica

A correta interpretação de resultados de ensaios pressiométricos pode não ser uma tarefa trivial, pois alguns fatores intrínsecos a técnica podem afetar diretamente a resposta do solo, como por exemplo, o tipo de sonda pressiométrica, a técnica de instalação e o procedimento de ensaio empregado. Por estas razões, grande parte dos métodos de interpretação baseia-se em metodologias de análises simples ou modificadas empiricamente, fundamentadas na teoria da expansão de cavidades cilíndricas para condições drenadas e não drenadas, onde a tensão *in situ* no início do ensaio representa a tensão horizontal no repouso (Clarke, 1997). Alguns destes fatores estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3- Fatores que podem interferir na interpretação de testes pressiométricos em solos (Clarke, 1997).

Fator	Possível Efeito	
Instalação	Pressiômetro de Pré-Furo (PPF)	1. Redução das tensões <i>in situ</i> ; 2. Amolecimento do solo adjacente à sonda; 3. Erosão de camadas frágeis; 4. Furo não-cilíndrico; 5. Nível de referência desconhecido.
	Pressiômetro Autoperfurante (PAP)	1. Super perfuração – alívio de tesões (PPF); 2. Sub perfuração – expansão de cavidade (PC); 3. Tensões de cisalhamento na interface.
	Pressiômetro de Cravação (PC)	1. Expansão da cavidade durante instalação.
	Alinhamento da sonda	1. Expansão não cilíndrica.
	Tipo de solo	1. Condições de drenagem desconhecidas.
Condições do Subsolo	Anisotropia	1. Expansão não cilíndrica;
	Descontinuidades	1. Meio não é contínuo, perda em continuidade.
	Estratigrafia errática	1. Deslocamentos variáveis ao longo da membrana.
Procedimento	Tensão intermediária	1. Tensão vertical não é intermediária em solos pré-adensados.
	Comprimento da Membrana	1. Restrição no final da sonda tende a formar expansão esférica.
	Fraturas de tração em profundidades rasas	1. Descontinuidades.
	Fraturas de tração em solos altamente pré-adensados	1. Descontinuidades.
	Taxa	1. Propriedades do solo dependem taxa de deformação.
	Sondas com medição volumétrica	1. Expansão média.
	Sondas com medição radial	1. Expansão pontual (transdutor)

A despeito das simplificações implícitas no processo de interpretação de resultados de ensaios pressiométricos, três importantes propriedades do solo podem ser obtidas dessas análises: a rigidez ou módulo cisalhante, a resistência ao cisalhamento e tensão horizontal *in situ*. Adicionalmente, Clarke (1997) indica que, de uma forma geral, os métodos empregados para obtenção destes e outros possíveis parâmetros do solo podem ser resumidos em três tipos, quais sejam:

- Interpretações empíricas que produzem diretamente parâmetros de projeto;
- Integração de um modelo tensão cisalhante-deformação assumido para produzir uma curva pressiométrica que é ajustada por dados de ensaios;
- Uma curva de ajuste aos dados do ensaio pressiométrico e sua diferenciação para obtenção da relação tensão cisalhante-deformação.

Enfocando a metodologia de interpretação de uma forma mais específica, sabe-se que um dos primeiros métodos de interpretação de ensaios pressiométricos foi desenvolvido por Gibson & Anderson (1961) para definir a pressão limite durante a fase de expansão em um material idealizado como elástico, perfeitamente-plástico. Este método ainda é bastante popular na interpretação de resultados de ensaios não drenados em argilas, pois se baseia no trecho de grandes deformações (plástico) do teste, que por sua vez, é pouco afetado pelos distúrbios de instalação da sonda (Ferreira, 1994).

Posteriormente, Palmer (1972), Ladanyi (1972) e Banguelin *et al.* (1972) desenvolveram independentemente soluções analíticas que possibilitaram a derivação da curva completa de tensão-deformação obtida por meio de ensaios não drenados com pressiômetros autoperfurantes. Entretanto, estas soluções consideram a inclinação da porção de carregamento da curva pressiométrica e, portanto, ainda refletem nos resultados interpretados qualquer influência de distúrbios causados durante a instalação da sonda. Elas são comumente referidas por “solução de Palmer”.

Em seqüência à evolução dos métodos de análise e interpretação, Houlsby & Withers (1988) foram os primeiros a sugerir que ensaios com pressiômetros de cravação do tipo *Full Displacement Pressuremeter* (FDPM) em argilas fossem analisados empregando-se a porção de descarregamento da curva pressiométrica. Ainda no mesmo ano, Jefferies (1988) propôs uma metodologia de interpretação

para resultados de ensaios PAP's não drenados em argilas incorporando a curva completa de carregamento e descarregamento do ensaio, representando, assim, a primeira tentativa de aproximação deste gênero.

Posteriormente, Withers *et al.* (1989), seguindo a análise proposta por Houlby & Withers (1988) para argilas, propuseram uma metodologia analítica para avaliação de parâmetros de resistência em areias. A partir deste estudo, diversas pesquisas foram realizadas na tentativa de melhor interpretar ensaios pressiométricos em areias (e.g. Houlby & Schnaid, 1994; Ghionna *et al.*, 1994; Yu, 1996).

Ainda, Manassero (1989) e Souza Coutinho (1990) propuseram métodos de interpretação baseados na análise do trecho de carregamento da curva pressiométrica. Apesar destes dois métodos não fazerem hipóteses a respeito da relação tensão-deformação do solo, a expressão tensão-dilatância de Rowe (1962) foi adotada como uma lei de fluxo de plastificação. O método de Manassero (1989) permite que a relação *razão de tensão-deformação cisalhante* seja obtida por meio de testes com pressiômetros autoperfurantes, modelados como expansão de uma cavidade cilíndrica infinitamente longa.

Em seguida, Yu (1994, 1996), a partir da definição de “parâmetro de estado do solo” (Been & Jefferies, 1985) observada na Figura 9, desenvolveu uma análise para derivar este parâmetro através de resultados de carregamento com pressiômetros autoperfurantes e demonstrou que, para uma dada areia em particular, existiu uma correlação linear entre a inclinação do trecho de carregamento da curva pressiométrica e o parâmetro de estado inicial do solo.

Adicionalmente, estudos experimentais com pressiômetros autoperfurantes e cone pressiômetros (e.g. Hughes & Robertson, 1985; Bellotti *et al.*, 1986; Schnaid & Houlby, 1994) demonstraram que a porção de descarregamento da curva pressiométrica é menos sensível a distúrbios iniciais do solo. Por esta razão, metodologias de interpretação baseadas no trecho de descarregamento têm sido desenvolvidas tanto para análises com areias (e.g. Houlby *et al.*, 1986; Withers *et al.*, 1989; Yu, 1990; Yu & Houlby, 1995) quanto para argilas (e.g. Jefferies, 1988; Houlby & Withers, 1988, Ferreira & Robertson, 1992).

Segundo Yu (1996), a primeira análise interpretativa baseada no trecho de descarregamento de ensaios pressiométricos em areias foi uma solução aproximada para pequenas deformações desenvolvida por Houlby *et al.* (1986) e

estendida posteriormente por Withers *et al.* (1989) para incluir o caso de cavidade esférica. A análise foi baseada em modelo elástico perfeitamente plástico de Mohr-Coulomb, onde a deformação elástica na zona de deformação plástica foi ignorada. Infelizmente, aplicações desta metodologia em interpretações de resultados de testes pressiométricos demonstraram que os valores de ângulo de atrito obtidos eram bem inferiores do que aqueles obtidos através da porção de carregamento da curva.

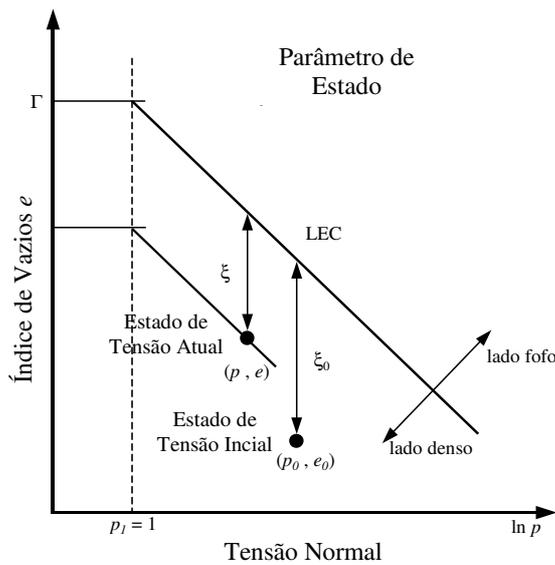


Figura 9- Definição de parâmetro de estado do solo – areias.

Empregando um modelo de solo similar, Yu (1990) e Yu & Houlsby (1995) apresentaram uma análise bem mais rigorosa da fase de descarregamento que considerou tanto grandes deformações quanto deformações elásticas da zona de plastificação. Todavia, de uma forma geral, as inclinações de descarregamento obtidas através de soluções com pequenas deformações são bem maiores das que aquelas medidas (Yu, 1996). A análise de descarregamento por grandes deformações prevê inclinações de descarregamento inferiores para areias fofas e moderadamente densas, e tendem a ter boa comparação com os valores medidos. Entretanto, os ângulos de atrito e dilatância derivados de inclinações de ciclos de descarregamento de ensaios pressiométricos ainda são muito menores do que os valores reais. Segundo Yu (1996), esta discrepância sugere que um modelo de solo elástico perfeitamente plástico de Mohr-Coulomb não é bastante eficiente para modelar o comportamento do solo durante o descarregamento em ensaios pressiométricos.

Adicional solução para o problema de expansão de cavidade cilíndrica é apresentada por Cudmani & Osinov (2001), onde empregam um modelo hipoeelástico como equação constitutiva, calibrada para dados experimentais de cones e pressiômetros provenientes de uma câmara de grandes dimensões. A calibração é realizada através da obtenção de um fator de forma, que conecta a resistência de ponta com a pressão limite do ensaio calculada para o caso cilíndrico ou esférico. Com isto, para um dado solo e através de uma série de soluções do problema de expansão de cavidades cilíndrica ou esférica, pode-se determinar a relação entre o estado do solo e a resistência de cone ou pressão limite medida em campo. Estas relações podem, então, ser utilizadas na solução do problema inverso com o intuito de obter a densidade e/ou coeficiente de empuxo a partir de resultados de CPT e PMT.

Por sua vez, um modelo Cam Clay modificado é apresentado por Cao *et al.* (2001) para modelar a expansão não drenada de cavidade, pois descreve bem o comportamento elasto-plástico do solo incorporando o efeito da história de tensões (Chang *et al.* 1999 *apud* Cao *et al.* 2001). Uma combinação da teoria de grandes deformações na zona plástica com teoria de pequenas deformações na zona elástica é adotada pelo autor para simplificar a solução.

Mais recentemente Hsieh *et al.* (2002) propuseram nova metodologia de interpretação empregando um estudo numérico baseado em um modelo unidimensional de elementos finitos em conjunto com o modelo avançado de solo MIT-S1, para obtenção de parâmetros de resistência em areias por meio de ensaios drenados com pressiômetros. Segundo Hsieh *et al.* (2002), este modelo é capaz de descrever de forma realista transições dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico de solos não coesivos que acontecem devido a variações no índice de vazios e pressão de confinamento, normalizada pela introdução do parâmetro de estado (Figura 9). A análise numérica idealiza o ensaio pressiométrico como a expansão de uma cavidade cilíndrica e ignora distúrbios causados pela instalação sendo, portanto, melhor aplicável para pressiômetros autoperfurantes. Resultados apresentados confirmam que há uma correlação linear entre o parâmetro de estado *in situ* do solo e o gradiente de expansão da cavidade, como sugerido por Yu (1994) usando um modelo bem mais simplificado.

## 2.4.2. Teoria da Expansão de Cavidade

### 2.4.2.1. Modelo Conceitual

Considere o caso ideal no qual uma sonda pressiométrica é inserida em um solo homogêneo, isotrópico e sem causar amolgamento do meio. Admite-se, ainda, que a sonda é instalada de maneira vertical (i.e. sem desalinhamento) e que a razão  $L/D$  da mesma é tal que o material adjacente é submetido a um estado plano de deformação. Neste caso, o ensaio pressiométrico pode ser modelado como uma cavidade cilíndrica, infinitamente longa, que se expande ou contrai no subsolo em função de variações de pressões na sonda. Schnaid (2000) ressalta que este caso é válido para análises considerando pequenas deformações, onde a razão entre o raio final expandido e o raio inicial é próximo da unidade –  $r/r_0 \approx 1$ . Todavia, para o caso de cone pressiômetros, a própria instalação da sonda já causa um grande amolgamento, isto é, uma expansão da cavidade de raio zero até o raio da sonda. Posteriormente, com o procedimento do ensaio, podem ocorrer expansões de até 50% da cavidade do furo (Clarke, 1995). Nesta pesquisa pretende-se superar este patamar nos ensaios de campo, tornado a relação  $r/r_0$  ainda mais distante da unidade. Por estas razões justifica-se a análise pressiométrica através do emprego da teoria de grandes deformações. Contudo, cabe ressaltar que alguns autores investigaram a expansão de cavidades em materiais compressíveis e dilatantes (e.g. Selvadurai, 1984; Carter *et al.*, 1986; Houlby & Yu, 1990; Souza Coutinho, 1990), considerando grandes deformações, e notaram que a solução para materiais incompressíveis (ensaio não drenados em argilas) era similar para as teorias de grandes e pequenas deformações. Além disto, uma análise comparativa para o caso de materiais dilatantes mostra que a solução é dependente do ângulo de dilatância e nível de deformação. Clarke (1995) acredita que para casos práticos empregando pressiômetros convencionais, a teoria de pequenas deformações é adequada.

Houlby & Withers (1988) estudaram a aplicação do FDPM em argilas e realizando análises em termos de tensões totais. Nas suas análise adotaram uma solução de pequenas deformações para a região de deformações elásticas em

combinação com análises em termos de grandes deformações na região de plastificação, similar ao procedimento empregado por Gibson & Anderson (1961).

Para compreender melhor o modelo de expansão de cavidade cilíndrica, sejam os estágios seguidos durante um ensaio pressiométrico mostrado na Figura 10. A Figura 10a define pontos em uma mesma linha que representam a condição *in situ* antes da instalação da sonda. O ponto A refere-se ao eixo central do pressiômetro. Após a cravação da sonda, o ponto A é movido até a distância  $R_i$  do ponto inicial, que representa o raio da própria sonda (Figura 10b). No início do ensaio, dadas as hipótese iniciais, a pressão na sonda iguala-se a pressão horizontal no solo, isto é,  $p_0 = \sigma_h$ . Esta igualdade somente é verdadeira para os pressiômetros do tipo autoperfurantes, enquanto que para os do tipo cravados, a pressão aplicada na membrana deve vencer a distância deixada pelo espaçador na ponteira cônica, para, então, tocar o solo, com isto,  $p_0$  é inferior do que  $\sigma_h$ . Procede-se, então com a expansão pressiométrica até seu limite máximo que faz com que o ponto A seja movido mais uma vez, agora até o raio  $R_e$  (Figura 10c). Finalmente, procede-se com a contração total da sonda que, por sua vez, traz o ponto A até o raio  $R_c$  (onde  $R_i < R_c < R_e$ ).

O ponto C está localizado na zona de plastificação durante as fases de instalação e expansão máxima (Figuras 10b e 10c), quando é movido até o raio  $r_{Ce}$ . Após a contração este ponto permanece no contorno elasto-plástico do raio  $r_{Cc}$ , quando a membrana é, então, desinflada. O ponto E, localizado inicialmente em  $r_{Eo}$ , no momento da máxima expansão da cavidade representa o limite elasto-plástico desta fase, definido pelo raio  $r_{Ee}$  (Figura 10c)

Ao final da expansão o material entre A e E foi plastificado, isto é, sofreu deformações elásticas e plásticas, enquanto que o material além do ponto E ainda está sob condições elásticas. Após a contração da membrana, o solo além do ponto E permanece sob condições elásticas, o solo entre C e E foi carregado plasticamente e descarregado elasticamente e o solo entre A e C foi carregado plasticamente e descarregado suficientemente para que a plasticidade reversa ocorresse, isto é, o material escoasse em extensão (Houlsby & Withers, 1988). De acordo com Clarke (1995) este descarregamento será elástico até que haja ruptura por extensão para o valor de  $(p_L - S_u)$  no caso das argilas, onde  $p_L$  é a pressão

limite, assumida igual à pressão do início do descarregamento, e  $S_u$  é a resistência ao cisalhamento do material.

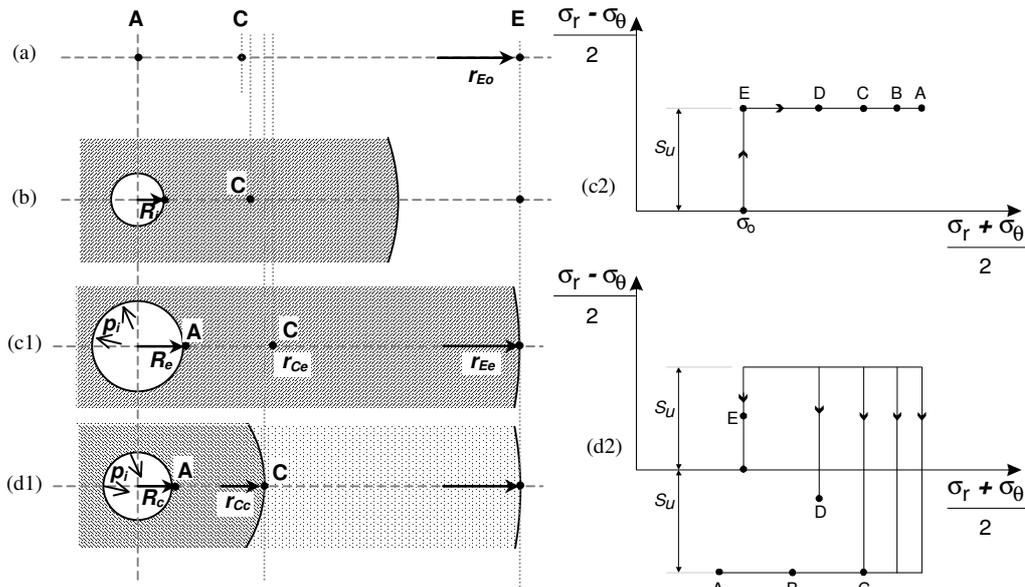


Figura 10- Definições dos raios empregados nas análises e das trajetórias de tensões em ensaios não drenados: (a) condição *in situ*; (b) após instalação; (c) na máxima expansão pressiométrica; (d) durante contração (Houlsby & Withers, 1988).

**2.4.2.2. Distribuição de Tensões**

Durante um ensaio pressiométrico e tomando-se em conta os estágios descritos anteriormente, seja um elemento de solo, de espessura  $\delta_r$ , raio  $r$  a partir do centro da sonda e submetido a um estado de tensões principais  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_v$  (tensão radial, circunferencial e vertical, respectivamente) (Figura 11). Timoshenko & Goodier (1934) demonstraram que a equação de equilíbrio que satisfaz este sistema é dada por:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + m \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad \dots(01)$$

em que  $m = 1$  caso cilíndrico  
 $m = 2$  caso esférico

À medida que a pressão na membrana aumenta de  $p_0$  para  $p_i$ , o raio interno do elemento muda para  $r + y$  e a espessura para  $\delta_r + \delta_y$ . A deformação circunferencial ( $\epsilon_\theta$ ) é dada pela Equação 2, pois a circunferência aumenta em  $2\pi r$

para  $2\pi(r+y)$ . Por sua vez, a espessura do elemento muda em  $\delta y$ , e a deformação radial ( $\epsilon_r$ ) é definida pela Equação 3. Estas são as equações de compatibilidade do sistema e são possíveis de determinação devido à condição de estado plano de deformação, onde não ocorrem deformações verticais (Houlsby e Withers, 1988).

$$\epsilon_\theta = \frac{y}{r} \quad \dots(02)$$

$$\epsilon_r = \frac{\delta y}{\delta r} \quad \dots(03)$$

As únicas variáveis medidas durante o ensaio são a pressão aplicada ( $p$ ) e o deslocamento (raio) da membrana ( $a$ ). A deformação circunferencial na parede da cavidade é usualmente referida como deformação de cavidade e é expressa por:

$$\epsilon_c = \frac{a - a_0}{a_0} \times 100 (\%) \quad \dots(04)$$

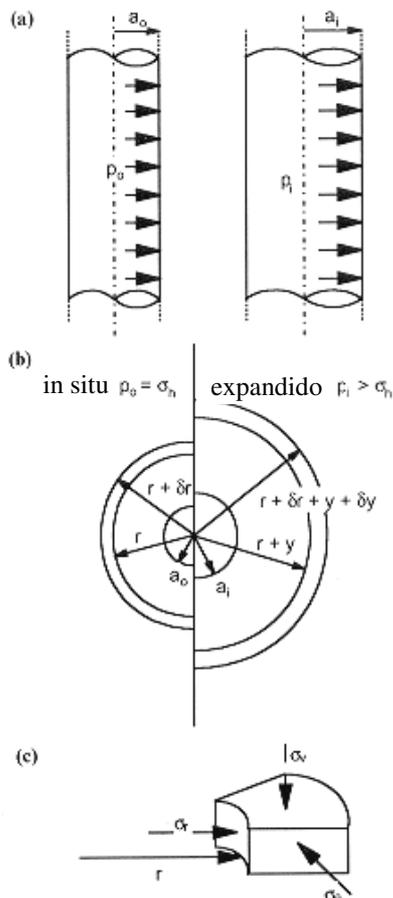


Figura 11- Definições empregadas na análise: (a) expansão de uma cavidade cilíndrica; (b) expansão de um elemento no raio  $r$ ; (c) estado de tensões no elemento do raio  $r$ .

Existem momentos em que as correlações de interpretação disponíveis são escritas em termos da variação volumétrica da cavidade ( $\Delta V/V$ ). Neste caso pode-se correlacionar a deformação da cavidade (Equação 4) com a variação volumétrica através da Equação 5

$$\frac{\Delta V}{V} = 1 - \frac{1}{(1 - \varepsilon_c)^2} \quad \dots(05)$$

### 2.4.2.3.

#### Análise da Expansão da Cavidade – regime elástico

Considere a cavidade expandindo-se em um solo linear elástico isotrópico, isto é, no qual a lei de *Hooke* se aplica. A análise assume que as tensões atuantes no solo (Figura 11) são as principais e as deformações principais ( $\varepsilon_v, \varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ ) relacionam-se com as variações em tensões principais segundo:

$$\begin{Bmatrix} \delta\varepsilon_r \\ \delta\varepsilon_\theta \\ \delta\varepsilon_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \delta\sigma_r \\ \delta\sigma_\theta \\ \delta\sigma_z \end{Bmatrix} \quad \dots(06)$$

De acordo com Houlsby & Withers (1988), para o caso esférico as deformações circunferenciais e radial são iguais (e tensões também), e como se trata de um estado plano cilíndrico, as deformações axiais são nulas, resultando na seguinte relação entre tensões:

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) \quad \dots(07)$$

A imposição destas simplificações produz a relação tensão-deformação na sua forma geral final, para ambos os casos estudados:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_r \\ \Delta\sigma_\theta \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & m\nu \\ \nu & 1-(2-m)\nu \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} \quad \dots(08)$$

A substituição da Equação 8 em 1 fornece a equação diferencial em termos de deformações. Posterior emprego das Equações 2 e 3 fornece a equação diferencial governante em função de deslocamentos:

$$\frac{d^2 y}{dr^2} + m \frac{dy}{dr} - m \frac{y}{r} = 0 \quad \dots(09)$$

que possui solução geral do tipo:

$$y = Ar + \frac{B}{r^m} \quad \dots(10)$$

em que A e B são constantes de integração.

As condições de contorno do problema são dadas por:

$$\begin{aligned} y &= 0 && \text{para } r = \text{infinito} \\ y &= a - a_0 && \text{para } r = a \end{aligned}$$

que fornecem os valores dos coeficientes  $A = 0$  e  $B = a^m (a - a_0)$ , com isto, obtêm-se as soluções do sistema:

$$\varepsilon_\theta = \frac{B}{r^{m+1}} \quad \dots(11)$$

$$\varepsilon_r = -m \cdot \varepsilon_\theta \quad \dots(12)$$

$$\sigma_\theta = -2 \cdot G \cdot \varepsilon_\theta \quad \dots(13)$$

$$\sigma_r = 2 \cdot m \cdot G \cdot \varepsilon_\theta \quad \dots(14)$$

Pode-se reescrever a equação 14 em função da deformação da cavidade medida a cada dado acréscimo de pressão ( $\Delta\sigma_r$ ), pois  $\varepsilon_\theta = \frac{a \cdot a_0}{r^{m+1}} \varepsilon_c$ , então para o trecho inicial da curva pressiométrica tem-se:

$$\Delta\sigma_r = \sigma_r - \sigma_h = 2mG \frac{a \cdot a_0}{r^{m+1}} \varepsilon_c \quad \dots(15)$$

As deformações circunferenciais e radiais no raio  $r$  são iguais e opostas e, como não há deformação vertical, não deve ocorrer mudança de volume no solo, isto é, as deformações ocorrem sob volume constante durante a fase elástica. Na parede da cavidade, ou seja, em  $r = a$ , a tensão radial é a pressão interna ( $\sigma_r = p$ ) e como o deslocamento ( $a - a_0$ ) é pequeno durante a fase inicial de expansão, então a Equação 15 pode ser reescrita como:

$$p - \sigma_h = 2mG\varepsilon_c \quad \dots(16)$$

Portanto, para um material isotrópico linear elástico, o módulo cisalhante no começo do teste pode ser determinado simplesmente tomando-se medidas do deslocamento da parede da cavidade e a respectiva variação de pressão. A rigidez inicial do solo é dada pelas equações 17 e 18, em termos de deformação da cavidade e deformação volumétrica, respectivamente.

$$G = \frac{0,5 \cdot (p - \sigma_h)}{\varepsilon_c} \quad \text{ou} \quad G = 0,5 \cdot \frac{a}{a_0} \cdot \frac{dp}{d\varepsilon_c} \quad \dots(17)$$

$$G = (p - \sigma_h) \frac{V_0}{\Delta V} \quad \text{ou} \quad G = V \frac{dp}{dV} \quad \dots(18)$$

### 2.4.3. Interpretação de Parâmetros

Três importantes propriedades do solo podem ser obtidas em ensaios pressiométricos: a rigidez (módulo cisalhante), a resistência ao cisalhamento e tensão horizontal *in situ*. Todavia, outros parâmetros do solo como ângulo de atrito, dilatância e compressibilidade, além de parâmetros de projeto como pressão limite, podem ser igualmente derivados de tais investigações *in situ* (Clarke, 1997). A Tabela 4 apresenta de forma sumarizada alguns métodos usualmente empregados na interpretação de ensaios pressiométricos, porém considerações

mais aprofundadas serão abordadas a seguir. Atualmente não existe metodologia desenvolvida especificamente para interpretação de ensaios pressiométricos em ADRSU.

### 2.4.3.1. Tensão Horizontal ( $\sigma_h$ )

De acordo com a tipologia de ensaio empregada a estimativa da tensão horizontal ( $\sigma_h$ ) pode ser extremamente subjetiva, pois as metodologias de análises de expansão de cavidade assumem um raio inicial  $r_0$  (Figura 12) como referência, de tal forma que a tensão na parede da cavidade naquele raio equivale à  $\sigma_h$ . Todavia, durante a instalação da sonda o estado de tensões pode ser modificado por esforços cisalhantes, compressivos e expansivos, contribuindo para a obtenção de valores de tensões que não representam a condição de repouso.

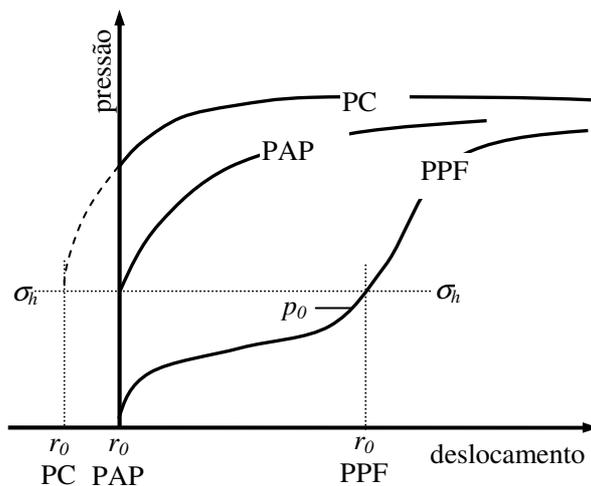


Figura 12- Influência do raio inicial da cavidade e tipo de pressiômetro em  $\sigma_h$ .

Ensaios com PAP's podem ser considerados os mais ideais para determinação da tensão horizontal, pois  $r_0$  se aproxima ao máximo do raio da sonda e, portanto, a pressão de *liftoff*, ou de “descolamento” da membrana, equivale-se a  $\sigma_h$ , desde que descontada a rigidez da membrana.

Em ensaios do tipo PPF, a identificação do nível de referência é dificultada, pois, à medida que se prossegue com o acréscimo de pressão, a expansão deve vencer, além da rigidez da membrana, a pressão da lama de estabilização do furo.

Tabela 4- Exemplos de métodos de interpretação comumente usados em ensaios pressiométricos (Clarke, 1995).

Tipo de Solo	Parâmetro	Sonda	Método	Referência	Equação	
Todos + rochas	$G_{ur}$ ou $G_u$ ou $G_r$	Todas	Ciclos de descarregar/recar.		$0,5 (dp/d\epsilon_c)$	
	$\sigma_h$	PPF	Ajuste de curva	Marsland e Randolph (1977)		
	$\sigma_h$	PAP	Diretamente da curva	Gupta (2000)	$p_L = \sigma_h + s_u + s_{ul} \ln[4I_r^2 / (4I_r - 1)]$	
	$\sigma_h$	PC	Curva de descarregamento	Houlsby e Withers (1988)	$p_L - s_{ul} [1 + \ln(G/s_u)]$	
	$G_u$ ou $G_u$ v $\epsilon_r$	Todas	Ciclos de descarregar/recar	Muir-Wood (1990)		
	$s_u$	PPF	Pressão limite modificada	Amar <i>et al.</i> (1975)	$(p_L - \sigma_h) / (5,5 \text{ a } 15)$	
	$s_u$	PAP	Trecho final da curva de carreg.	Windle e Wroth (1975)	$p = p_L - 2s_{ul} [1 + \ln(G/s_u) + \ln(\Delta v/V)]$	
	$s_u$	PC	Curva de descarregamento	Houlsby e Withers (1988)	$p = p_L - 2s_{ul} \{1 + \ln[\sinh(\epsilon_{max}/\epsilon) / \sinh(s_u/G)]\}$	
	Areias	$\sigma_h$	PPF PC	Não recomendado		
		$\sigma_h$	PAP	Diretamente da curva		
$G_u$ ou $G_u$ v $\epsilon_r$		Todas	Curva de descarregamento	Bellotti <i>et al.</i> (1989)		
$\phi'$		PPF	Não recomendado	Ménard (1957b)	$p_{lm} = b \cdot 2^{(\phi' - 24)/4}$ $b = 1,8$ (úmida) $b = 3,5$ (seca)	
$\phi'$		PAP	Trecho final da curva de carreg.	Hughes <i>et al.</i> (1977)	$\text{sen } \phi' = \{s / [1 + (s-1) \text{sen } \phi'_{cv}]\}$	
$\phi'$		PC	Curva de descarregamento	Houlsby e Nutt (1993) Yu <i>et al.</i> (1996)	$(p_L - \sigma_h) / \sigma'_h = 2,21 + 19,35 \text{ Dr}$ $(q_c - \sigma_h) / (p_L - \sigma_h) = 3,80 - 9,84 \text{ Dr}$ $\phi_{ps} = [12,7 / \ln(G/\sigma'_{vo})] \cdot (q_c / p_L) + 22,7$	
$\Psi$		PAP	Trecho final da curva de carreg.	Yu <i>et al.</i> (1996)	$\text{sin } \Psi = s + (s-1) \text{sen } \phi'_{cv}$	

Quando a membrana toca a parede do furo, a respectiva pressão  $p_0$  (Figura 12) é menor que  $\sigma_h$ , pois houve amolgamento e alívio de tensões pela perfuração.

A tensão horizontal não pode ser obtida diretamente através da curva pressiométrica de ensaios com PC, pois ocorre aumento de tensões localizadas durante a instalação da sonda. Sendo assim, a pressão aplicada durante a fase de carregamento nestes ensaios é sempre maior que  $\sigma_h$ , não sendo possível a obtenção de um ponto de referência. Portanto, empregam-se correlações semi-empíricas nos trechos de descarregamento para proceder com a análise.

Segundo Clarke (1995), de uma forma geral, alguns métodos subjetivos têm sido desenvolvidos para auxiliar na estimativa da tensão horizontal a partir de curvas pressiométricas e incluem:

- Método do descolamento – *lift-off*;
- Métodos baseados na resistência ao cisalhamento;
- Métodos baseados no procedimento de ensaio;
- Funções de ajuste da curva teste e
- Correlações empíricas com outros parâmetros.

Os métodos descritos por Clarke, (1995) foram desenvolvidos em função da natureza subjetiva da seleção do ponto de “descolamento” da membrana. Este ponto ou *lift-off* representa a pressão na qual a membrana descola da sonda e causa deformações. Como estas são mínimas em ensaios autoperfurantes, a tensão horizontal somente pode ser obtida diretamente através desses pressiômetros (Akbar, 2001). Originalmente os métodos de determinação da tensão horizontal foram concebidos para testes com PAP e, mais subjetivamente, para PC.

Para investigações com PC do tipo FDP, Houlsby & Withers (1988) recomendam, com certa restrição, a correlação observada na Tabela 4 para obtenção de  $\sigma_h$  em argilas. Entretanto, Akbar (2001) empregou com sucesso esta metodologia com um pressiômetro similar ao desenvolvido nesta pesquisa.

#### 2.4.4. Módulo Cisalhante ( $G$ )

Há referência na literatura sobre diversas terminologias empregadas na definição de módulos provenientes de ensaios pressiométricos, como é possível observar na Tabela 5. Os módulos cisalhantes (e.g.  $G_i$ ,  $G_u$ , etc.) podem ser obtidos pelas Equações 19 e 20. Todavia, estes não são módulos de um elemento no subsolo e sim, uma representação da rigidez média do trecho avaliado. Por sua vez, os módulos elásticos (e.g.  $E_m$ ,  $E_m^-$  e  $E_m^+$ ) são derivados de ensaios com pressiômetros de Ménard, nos quais o coeficiente de *Poisson* é assumido com um valor de 0,33. A razão  $E_m^-/E_m^+$  é conhecida como coeficiente reológico ( $\alpha$ ).

Tabela 5 - Terminologia empregada na definição de módulos provenientes de ensaios pressiométricos (Clarke, 1995).

$G_i$	Módulo Cisalhante secante inicial
$E_m$	Módulo de Ménard
$G_{ur}$	Módulo Cisalhante secante de um ciclo de descarga/recarga
$G_u$	Módulo Cisalhante secante de um trecho de descarga
$G_r$	Módulo Cisalhante secante de um trecho de recarga
$E_m^-$	Módulo Elástico secante de um trecho de descarga
$E_m^+$	Módulo Elástico secante de um trecho de recarga
$E_{mo}$	Módulo Elástico Máximo de um trecho de descarga
$E_{ro}$	Módulo Elástico Máximo de um trecho de recarga
$G_n$	Módulo Cisalhante secante medido sobre uma faixa de deformação $n\%$
$G_o$	Módulo cisalhante máximo
$G_s$	Módulo equivalente de um elemento
$G_{uro}$	Módulo cisalhante equivalente na tensão efetiva <i>in situ</i>

##### 2.4.4.1. Módulo Inicial

A melhor maneira de se obter o módulo cisalhante de um solo é quando este apresenta um comportamento idealmente elástico. Neste caso,  $G$  é obtido pela análise da porção inicial da curva pressiométrica. Para pequenas deformações a relação  $r_1/r_0$  é pequena e  $V \approx V_0$ , portanto  $G_i$  pode se obtido por:

$$G = 0,5 \cdot (p - \sigma_h) / \varepsilon_c \quad \dots(19)$$

$$G = V_0 \cdot (p - \sigma_h) / \Delta V \quad \dots(20)$$

onde  $p-\sigma_h$  é a diferença de pressão no ciclo;  $\varepsilon_c$  é a deformação da cavidade, e  $V_o$  é o volume inicial.

Porém, devido à possível magnitude dos amolgamentos no solo causados pela instalação da sonda, este trecho pode representar, de fato, a rigidez do solo deformado. Para minimizar este efeito, a metodologia mais indicada para modelar as características elásticas do meio é a realização de ciclos de descarregamento e recarregamento, desde que o nível de tensões aplicadas seja tal que não cause ruptura por extensão (Clarke, 1995). Desta forma, pode-se obter um valor médio de módulo cisalhante representativo do trecho ensaiado.

#### 2.4.4.2.

#### **Modulo de Descarregamento – Recarregamento ( $G_{ur}$ )**

Se o módulo do solo intacto é requerido, então, é necessário expandir a membrana suficientemente para atingir a região não amolgada, que, por sua vez, é função da metodologia de instalação empregada. Então, uma vez realizada a expansão, a membrana é desinflada descarregando o solo adjacente elasticamente. Todavia, caso este descarregamento seja demasiado poderá ocorrer ruptura do solo por extensão (Clarke, 1995), o que não é desejável caso ainda não se tenha encerrado o ensaio. Procede-se, então, com a fase de recarregamento, que será elástica até ocorrer escoamento, ou seja, até aproximadamente o ponto referente ao estado de tensão onde o descarregamento anterior teve início.

O módulo cisalhante médio pode ser obtido por duas maneiras nestes ciclos de descarga-recarga. O primeiro método, bastante simples, produz uma rigidez secante média e é obtido pela reta de melhor ajuste de todos os pontos que formam o ciclo (Figura 13). A inclinação desta reta é o dobro do módulo cisalhante. Este módulo representa a rigidez média dos elementos do solo adjacentes à sonda em relação à tensão efetiva do ponto de descarregamento (Clarke, 1997). Este método é aplicável para quaisquer tipos de pressiômetros e solos (Clarke, 1995). Adicionalmente, Houlsby & Schnaid (1994) recomendam que o módulo de cisalhamento seja determinado também a partir da inclinação de uma única linha traçada entre os dois ápices do ciclo. Contudo, eles observaram

que este método implica em valores 20% a 30% maiores quando comparados com o método anterior.

Um método alternativo de obtenção do módulo é selecionar pontos referentes a faixas específicas de deformação. Clarke (1996) recomenda faixas de 0.1% ou 0.2% de deformação, visto que estas magnitudes representam deformações médias típicas observadas em solos abaixo ou adjacentes a fundações. A inclinação é determinada tanto a partir do trecho de descarregamento, selecionando-se a deformação mínima da cavidade como origem, quanto do trecho de recarregamento, neste caso utiliza-se a deformação máxima da cavidade como origem. Segundo Clarke (1993), a porção de recarregamento produz valores mais consistentes.

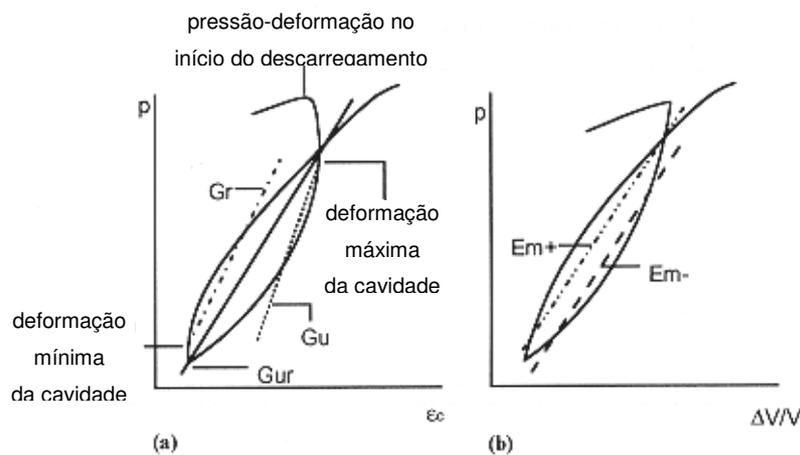


Figura 13- Ciclos de descarregamento e recarregamento mostrando inclinações usadas para estimar  $G_u$ ,  $G_r$ ,  $E_{m-}$  e  $G_{ur}$  (inclinação é o dobro do módulo cisalhante): (a) módulos cisalhantes; (b) módulos elásticos.

#### 2.4.4.3. Resistência ao Cisalhamento Não-Drenada ( $S_u$ )

A resistência do solo proveniente dos três tipos de pressiômetros abordados anteriormente pode ser determinada de diversas maneiras onde, para cada método, obtêm-se diferentes resultados (Wroth, 1984). Nos casos de PAP's, a resistência pós-pico (com aplicação p.ex. na análise de estabilidade) é obtida pelo trecho final da curva de carregamento, considerando-se um modelo perfeitamente plástico para o solo, como observado na Figura 14. Por sua vez, em ensaios com PPF's,  $S_u$  é normalmente obtida com correlações empíricas como a apresentada na Tabela 4

que emprega a pressão limite  $p_L$  requerida para dobrar o tamanho da cavidade no início do ensaio (Akbar, 2001).

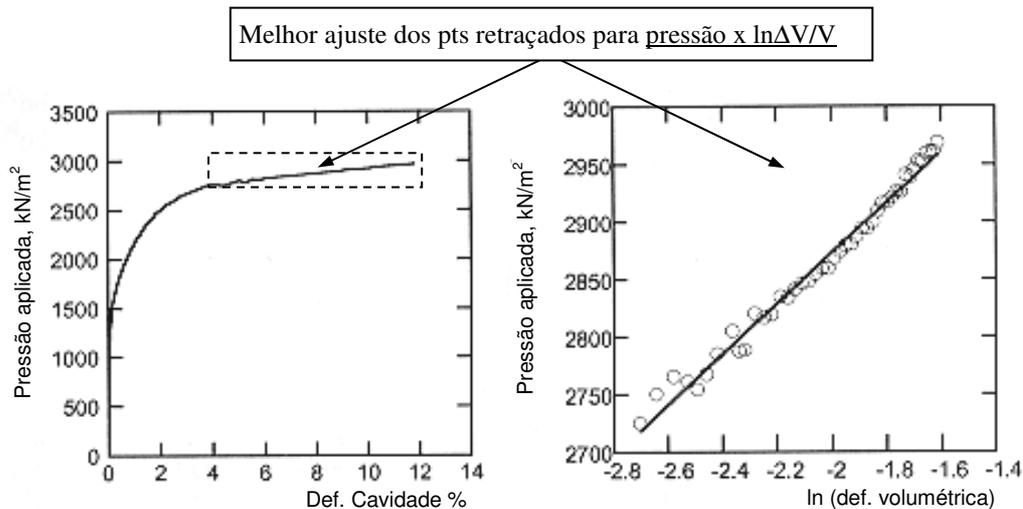


Figura 14- Interpretação de ensaios com PAP para determinação de  $S_u$ .

A resistência não drenada pode ser determinada, ainda, pela porção da curva de descarregamento em ensaios com PC's, como proposto por Houlsby & Withers (1988). Este método pode fornecer, simultaneamente, o módulo cisalhante ( $G$ ) e a tensão horizontal *in situ* ( $\sigma_h$ ). A construção do trecho de descarregamento da curva por este método está ilustrada na Figura 15. Nela, as pressões de expansão da cavidade estão representadas contra os valores de  $-\ln\left(\frac{m+1}{2} \cdot (\varepsilon_m - \varepsilon)\right)$  referentes ao trecho final da curva. A variável  $m$  assume valores 1 ou 2 para o caso de expansão cilíndrica ou esférica respectivamente. À medida em que a expansão é cilíndrica, o termo  $-\ln\left(\frac{m+1}{2} \cdot (\varepsilon_m - \varepsilon)\right)$  reduz-se para  $-\ln(\varepsilon_m - \varepsilon)$ , onde  $\varepsilon$  representa a deformação da cavidade para qualquer dada pressão e  $\varepsilon_m$  é a máxima deformação alcançada no ensaio. O valor da tensão horizontal ( $\sigma_h$ ) é o ponto intermediário entre a pressão limite ( $p_L$ ) e o intercepto da extensão da linha de tendência sobre o trecho de descarregamento plástico. A inclinação desta linha é dada por  $2S_u(2+m)/3$ , que se reduz para  $2S_u$  para o caso de expansão cilíndrica. A abscissa do ponto de interseção da pressão limite com a linha de descarregamento plástico é dada por  $1 + \ln(I_r)$ , onde  $I_r$  é o índice de rigidez definido por como  $G/S_u$ . Portanto, sabendo-se  $1 + \ln(I_r)$  e  $S_u$ , calcula-se  $G$ .

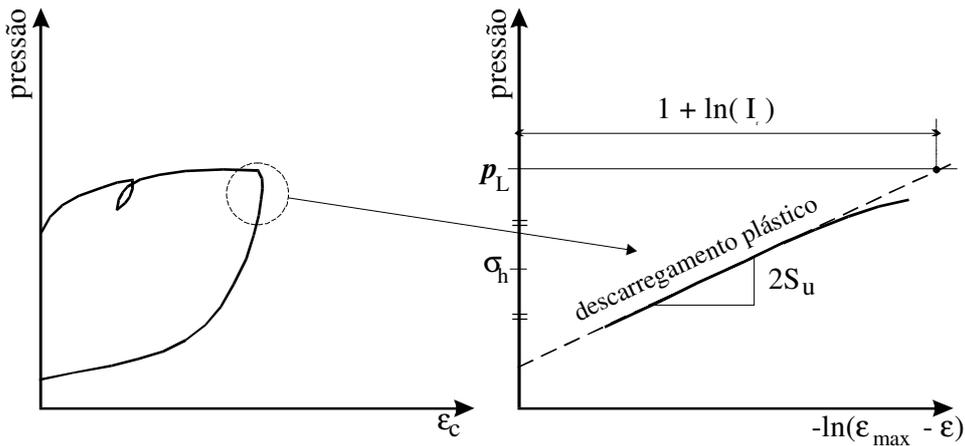


Figura 15- Determinação de  $S_u$ ,  $\sigma_h$  e  $G$  segundo Houslby e Withers (1988).

**2.4.4.4. Ângulo de Atrito ( $\phi$ )**

Hughes *et al.* (1977) recomendam que o ângulo de atrito de areias densas seja estimado através da porção final da curva de carregamento de ensaios com PAP's como mostrado na Figura 16 e pela correlação dada na Tabela 4. Esta correlação requer o conhecimento de "s", que é a inclinação do trecho final da curva de carregamento, e  $\phi'_{cv}$  que é o ângulo de atrito a um volume constante (Tabela 6). Porém, como  $\phi'_{cv}$  não é crítico na determinação de  $\phi$ , Clarke (1996) recomenda que um valor médio de  $35^\circ$  deva ser empregado.

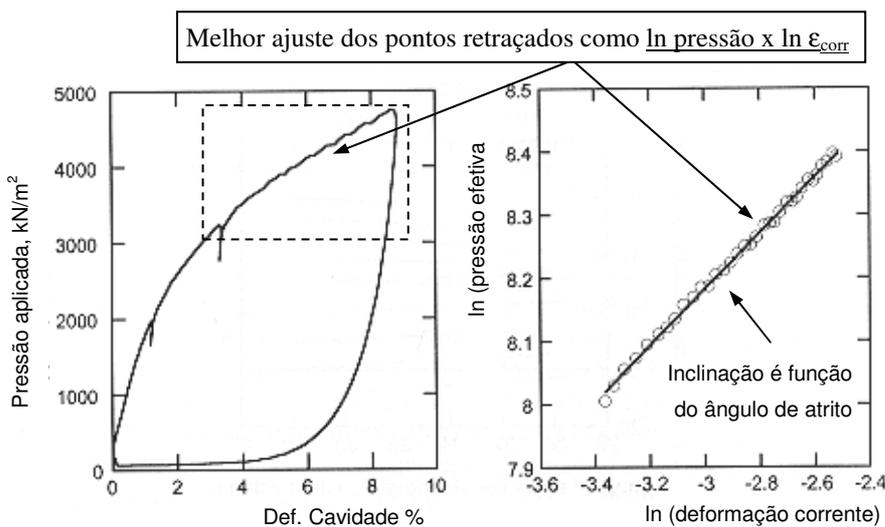


Figura 16- Determinação de  $\phi'$  através de ensaios com PAP's em areias densas (Clarke 1997).

em que a deformação corrente é dada por: 
$$\epsilon_{corr} = \frac{r_i - r_0}{r_i} = \frac{\epsilon_c}{1 + \epsilon_c}$$

Tabela 6 - Valores típicos de  $\phi'_{cv}$  (Robertson & Hughes, 1986).

Tipo de Solo	$\phi'_{cv}$
Pedregulho-areia-silte bem graduado	40
Areia grossa uniforme	37
Areia média bem graduada	37
Areia média uniforme	34
Areia fina bem graduada	34
Areia fina uniforme	30

Devido ao elevado amolçamento causado durante a instalação dos PC's e PPF's, não é possível a determinação direta de  $\phi'$  com estes tipos de pressiômetros. Adicionalmente, Mair & Wood (1987) recomendam que não se utilizem dados de PPF's para avaliar  $\phi'$ , porém Ménard propôs a correlação apresentada na Tabela 4 para este fim, onde também estão outras correlações para os diversos tipos de sondas pressiométricas.

Para PC's, duas equações (Houlsby & Nutt, 1993; Yu *et al.*, 1996) são apresentadas na Tabela 4 e que podem ser combinadas para produzir uma relação entre densidade relativa, pressão limite e resistência do cone, desde que não haja excessos de poropressões e que estas sejam conhecidas *a priori*. Se a pressão limite e a resistência de ponta são conhecidas do ensaio, então, a densidade relativa pode ser determinada e, conseqüentemente, o ângulo de atrito também por meio de correlações desenvolvidas entre  $\phi'$  e  $D_r$ . Esta metodologia possui a desvantagem de requerer dados de ambos ensaios pressiométricos e de cone. Contudo, seguindo a recomendação de Van Wieringer (1982) sobre correlações entre pressão limite e resistência de ponta de cone (Equações 21 e 22) pode-se estimar  $q_c$  e, portanto, a equação da Tabela 4 torna-se simples e dependente de apenas um ensaio de campo.

$$q_c = 3 \cdot p_L \quad \text{para argilas} \quad \dots(21)$$

$$q_c = 15 \cdot (\tan \phi')^{1.75} \quad \text{para areias} \quad \dots(22)$$

Nas duas equações anteriores,  $p_L$  é a pressão limite, definida como: “a máxima pressão alcançada durante um ensaio pressiométrico na qual a cavidade

continuar a expandir-se indefinidamente” (Akbar, 2001). Na realidade, isto não é possível, pois a expansão da membrana é restrita. Todavia, o seu valor pode ser estimado extrapolando-se a curva para o infinito (Akbar, 2001).

Yu *et al.* (1996) desenvolveram um método para determinar o ângulo de atrito interno das areias usando resultados de ensaios com PC's baseado na razão entre a resistência de ponta do cone e a pressão limite. A equação para este fim está apresentada na Tabela 4. O módulo cisalhante a ser empregado pode ser estimado em ciclos de descarregamento-recarregamento como descrito anteriormente.

### 3 Propriedades Mecânicas dos RSU

#### 3.1. Introdução

A avaliação das propriedades mecânicas de RSU está correlacionada a um problema de grande interesse do meio geo-ambiental, que é o recalque das células de ADRSU associado a processos mecânicos e de degradação biológica. A estimativa dos recalques é relevante no dimensionamento da capacidade máxima de estocagem de resíduo e no desenvolvimento de projetos de recuperação ambiental da área de disposição e é usualmente realizada utilizando-se adaptações da teoria de adensamento unidimensional de solos de Terzaghi (e.g. Simões & de Campos, 1998). Neste caso, os parâmetros de compressibilidade / deformabilidade empregados nos modelos matemáticos são geralmente obtidos em ensaios especiais de compressão confinada (e.g. Landva & Clark, 1990; Grisólia *et al.*, 1992; Jessberger & Kockel, 1995, Gabr & Valero, 1995; Chen & Chou, 1998; Carvalho *et al.*, 2000), por meio de provas de carga instrumentadas (e.g. Cartier & Baldit, 1983; Dunplancic, 1990; Jucá & Melo, 1999) ou por intermédio de retroanálises envolvendo longas campanhas de monitoramento no campo (e.g. Coduto & Huitric, 1990; Watts & Charles, 1990; Cepollina *et al.*, 1994; Sanchez-Alciturri *et al.*, 1995; Gasparini *et al.*, 1995; Stultgis *et al.*, 1995; Jucá *et al.*, 1997, 1999; Mariano & Jucá, 1998). Todavia, em virtude das características de cada metodologia de obtenção empregada, esses parâmetros podem apresentar limitações, seja por representarem condições unidimensionais (ensaios edométricos) ou por envolverem massas limitadas de material (provas de carga).

Em contrapartida, investigações voltadas para determinar as características peculiares do comportamento tensão-deformação do RSU por meio da obtenção de parâmetros de deformabilidade como o módulo de *Young*, coeficiente de *Poisson* e módulo cisalhante, não tem sido o alvo principal do interesse geotécnico quando se trata de RSU. A dificuldade de obtenção *in situ* de tais parâmetros é compreensível ou justificável considerando as condições

operacionais da aplicação em RSU de técnicas consagradas para solos ou, ainda, pela própria heterogeneidade de materiais constituintes do lixo. Além disto, certamente alguns destes parâmetros têm seu valor modificado segundo as características físicas de cada aterro e por fatores associados à decomposição, o que dificulta ainda mais a sua determinação em campo.

Além das questões sobre compressibilidade e recalques em células de ADRSU, existem os problemas de rupturas e deslizamentos dos taludes das células que também detêm interesse geotécnico. Este, por sua vez, tem levado à intensa busca por parâmetros de resistência como coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ), obtidos por meio de técnicas de campo e laboratoriais, para subsidiar análises de estabilidade.

A seguir, serão abordados resultados práticos de algumas metodologias para obtenção de parâmetros de resistência e deformabilidade de resíduos sólidos urbanos disponíveis na literatura.

### **3.2. Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento**

De acordo com Jessberger & Kockel (1991), algumas propriedades mecânicas dos RSU, como resistência, compressibilidade e deformabilidade, dependem da composição do resíduo, das propriedades mecânicas de seus constituintes e da influência da decomposição e teor de umidade nestas propriedades, o que contribui para aumentar a variabilidade de resultados reportados. Em particular com relação à resistência ao cisalhamento destes materiais, a sua determinação tem sido realizada por diversos autores por meio de ensaios de campo, de laboratório e por retroanálises de performances de campo. Bons exemplos de compilações do estado-da-arte sobre o assunto foram apresentados por Singh & Murphy (1990), Jessberger (1994), Gabr & Valero (1995), Edinçliler *et al.* (1996), Koda (1998), Van Impe (1998), Eid *et al.* (2000) e, mais recentemente, por Pelkey *et al.* (2001) e Vilar & Carvalho (2002). Apesar do avanço atingido, o estudo do comportamento tensão-deformação-resistência de RSU ainda é um tema complexo, principalmente devido aos efeitos da heterogeneidade de seus constituintes, onde materiais inertes coexistem com matrizes altamente deformáveis e/ou biodegradáveis. Além do efeito da

heterogeneidade nos resultados de campo, é possível que os resultados de investigações laboratoriais também tragam consigo efeitos da escala reduzida das amostras, associados às dificuldades de amostragem e reprodução das condições *in situ* e temporais. Por isto, Edinçliler *et al.* (1996) postulam que a melhor metodologia para estudar propriedades mecânicas de resíduos sólidos é conduzir uma série de ensaios laboratoriais de grandes dimensões em conjunto com alguns ensaios de campo em grande escala. Os laboratoriais são usados para caracterizar propriedades básicas que afetam a resistência do resíduo, e os *in situ* são utilizados para compreender como o efeito da escala na resistência medida.

Dados de resistência de RSU são tipicamente apresentados em função de parâmetros de Mohr-Coulomb, isto é, em termos de intercepto coesivo ( $c$ ) e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ). Porém, dada a característica peculiar da relação tensão-deformação do RSU, cujo comportamento marcante é a inobservância de um padrão de ruptura definido, até mesmo para valores altos de tensões, leva-se a crer que se a teoria de Mohr-Coulomb é satisfatória para descrever o comportamento do RSU, então os parâmetros de resistência ao cisalhamento devem ser definidos ou considerados como dependentes da deformação (*strain dependent*).

Valores de resistência de RSU disponíveis na literatura apresentam grande dispersão devido aos fatores mencionados. Além destes, outros como a idade, composição e teor de umidade podem ter grande influência nos resultados. Faixas de valores e metodologias disponíveis na literatura serão abordados nos itens subseqüentes.

### **3.2.1. Investigações de Laboratório**

#### **3.2.1.1. Resultados de Ensaio de Cisalhamento Direto e Simples**

Diversos pesquisadores têm reportado valores de resistência ao cisalhamento em RSU obtidos pelo emprego de ensaios de cisalhamento direto em laboratório. Aqui serão abordados somente alguns mais importantes e de forma pormenorizada, apresentando apenas os parâmetros de resistência relevantes

obtidos nas investigações e algumas características peculiares dos equipamentos utilizados.

Landva & Clark (1986) empregaram um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões (43,4cm x 28,7cm) na determinação da resistência de RSU de amostras de resíduos considerados velhos (não é fornecida a idade), obtendo  $\phi = 38^\circ$  a  $42^\circ$  e  $c = 14\text{kPa}$  a  $19\text{kPa}$ . Posteriormente, as amostras foram armazenadas por um ano em barris plásticos onde sofreram um processo de decomposição, sendo posteriormente ensaiadas fornecendo um ângulo de atrito decrescido para  $33^\circ$ , porém a coesão manteve-se em um patamar de  $16\text{kPa}$ . Landva & Clark (1986) acreditam que a perda de resistência tenha sido justificada pela decomposição, mas indicam necessidade de mais investigações para confirmação. Além deste teste, os mesmos autores conduziram ensaios com um resíduo novo triturado, constituído por uma grande porcentagem de material plástico, e encontraram  $\phi = 24^\circ$  e  $c = 23\text{kPa}$ . O baixo ângulo de atrito foi atribuído à pequena fricção entre folhas plásticas alinhadas. Finalmente, aqueles autores investigaram a resistência de um aterro constituído basicamente de resíduos provenientes da extração e processamento de madeira, obtendo  $\phi=33^\circ$  e  $c = 10\text{kPa}$ .

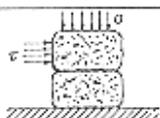
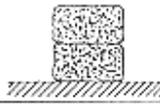
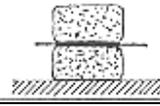
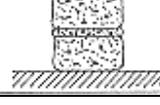
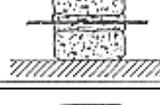
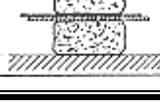
Siegel *et al.* (1990) conduziram ensaios de cisalhamento direto sob condições consolidadas e drenadas em amostras de resíduos com 13cm de diâmetro e 7,6 a 10,2cm de altura, obtidas em profundidades de 4,6 a 25m. Os espécimes para os ensaios foram preparados a partir de cinco diferentes amostragens, possuindo, portanto, diferentes constituições e resistências. O pico de máxima resistência ao cisalhamento foi obtido para deslocamentos cisalhantes variando de 16% a 39% do diâmetro da amostra. Os autores apresentaram os seus resultados com dois limites inferiores de envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb, um representando a interpretação de todos os ensaios e outro negligenciando amostras que continham partículas maiores de solo. Em ambos os casos eles admitiram coesão nula e os ângulos de atrito reportados foram  $53^\circ$  e  $39^\circ$ , respectivamente.

Howland & Landva (1992) apresentam resultados de ensaios de cisalhamento direto em laboratório em uma diversidade de materiais. Os ensaios foram executados em uma caixa de grandes dimensões (43,2cm x 27,9cm) com resíduos com idades entre 10 a 15 anos, amostrados com trados helicoidais de

eixo sólido com 15,2cm e 27,9cm de diâmetro. Durante os ensaios, as amostras foram submetidas a tensões normais da ordem de 574kPa e cisalhadas até um máximo de deslocamento de 10,2cm, sob condições drenadas. Em seguida, os dados de ângulo de atrito e coesão foram reportados com valores de 33° e 17kPa, respectivamente.

Del Greco & Oggeri (1994) estudaram o problema empregando fardos de lixo de 40cm x 50cm x 60cm, compactados com macacos hidráulicos (densidades variando de 400 a 600kg/m<sup>3</sup>), alternando o tipo de material de interface entre eles (RSU-RSU, geomembrana-RSU, RSU-areia, etc). Nos ensaios, as amostras foram cisalhadas sob tensões normais de 20 a 80kPa, porém os autores não mencionam a porcentagem de deformação referente aos valores obtidos, estando os mesmos sintetizados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros de resistência de fardos de RSU compactados e *liners* (Del Greco & Oggeri,1994).

<b>Tipo de Interface</b>	<b>Configuração</b>	<b><i>c</i> (kPa)</b>	<b><math>\phi</math> (°)</b>
RSU x RSU ( $\gamma= 500\text{kg/m}^3$ )		16	21°
Lixo x Lixo ( $\gamma= 700\text{kg/m}^3$ )		24	22°
geomembrana (PDAD) x RSU		0	17°
Areia grossa x RSU		15	38°
geomembrana (PDAD) x argila		8	26°
geomembrana (PDAD) x geotextil		0	14°

Valero (1994) e Gabr & Valero (1995) investigaram RSU com 10 a 15 anos de idade usando uma caixa de cisalhamento direto circular com diâmetro de 6,4cm e espessura de 2,3cm, com amostras preparadas contendo somente partículas

menores do que 6,3mm. Para o caso em questão, três amostras de diferentes origens foram ensaiadas com tensões normais de 69 a 276kPa e os resultados avaliados. Com eles, Valero (1994) verificou que cada amostra continuava a exibir acréscimo de resistência para deslocamentos superiores a 10% do diâmetro e obteve  $\phi$  na faixa de 20° a 39° e  $c$  entre 0 e 28kPa, enquanto que Gabr & Valero (1995) sugeriram que as variações nos parâmetros de resistência ao cisalhamento podiam ser devidas a variações na idade dos espécimes, composição, granulometria e densidade.

Em seqüência, ensaios de cisalhamento direto foram realizados por Edinliler *et al.* (1996) com uma máquina equipada com uma caixa circular de cisalhamento de 0,30m de diâmetro, capaz de conduzir testes sob várias taxas de carregamento e pressões confinantes. Detalhes do equipamento empregado são descritos por Foose (1993). Adicionalmente, Edinliler *et al.* (1996) também construíram outra prensa de cisalhamento direto de grande escala, com 1,2m x 1,2m x 0,9m de altura, servo-controlada e monitorada por LVDT's, porém a apresentação dos resultados de sua aplicação prática não foi o objeto do referido artigo. Todavia, Edinliler *et al.* (1996), através do emprego de sua caixa de cisalhamento de 0,30m, obtiveram curvas de tensão *cisalhante x deslocamento* típicas mostradas na Figura 17 que mostram que na maioria dos casos a resistência de pico não foi alcançada para deslocamentos de até 6cm, ocorrendo um contínuo aumento de tensão com aumento de deslocamento horizontal. Além destes resultados, amostras coletadas em diferentes momentos e locais no aterro, e posteriormente preparadas com energias de compactação e grau de saturação diferentes, forneceram a envoltória de resistência da Figura 18. Através dela, Edinliler *et al.* (1996) obtiveram os parâmetros de resistência  $\phi$  e  $c$  com os valores médios de 42° e 27kPa.

Em março de 1996, ocorreu uma grande ruptura de talude em aterros de RSU nos Estados Unidos, envolvendo cerca de 1,2 milhões de m<sup>3</sup> de resíduo. Por conta disto, Eid *et al.* (2000) revisaram e analisaram parâmetros de resistência provenientes principalmente de cisalhamento direto, tanto em campo quanto em laboratório, disponíveis da literatura, para seleção de parâmetros geotécnicos e posterior emprego em uma análise de estabilidade do aterro da cidade de Cincinnati, USA, descrita por Stark *et al.* (2000). Em seu trabalho, Eid *et al.* (2000) compilam resultados de cisalhamento direto de grandes dimensões e

algumas retro-análises de ruptura e acreditam que a interpretação dos resultados sugere que a resistência de RSU pode ser definida por uma faixa estreita de valores, com  $\phi'$  de aproximadamente  $35^\circ$  e  $c'$  na faixa de 0 a 50kPa. Todavia, baseado em informações adicionais da literatura, Eid *et al.* (2000) acreditam que os valores médios mais apropriados para  $c'$  e  $\phi'$  são 25kPa e  $35^\circ$ , respectivamente.

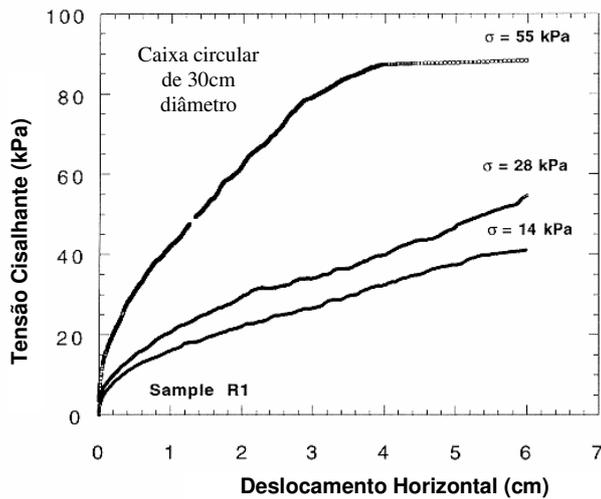


Figura 17 - Curvas típicas de *tensão cisalhante x desl. horizontal* obtidas em ensaios de cisalhamento direto (Edinçliler *et al.* 1996).

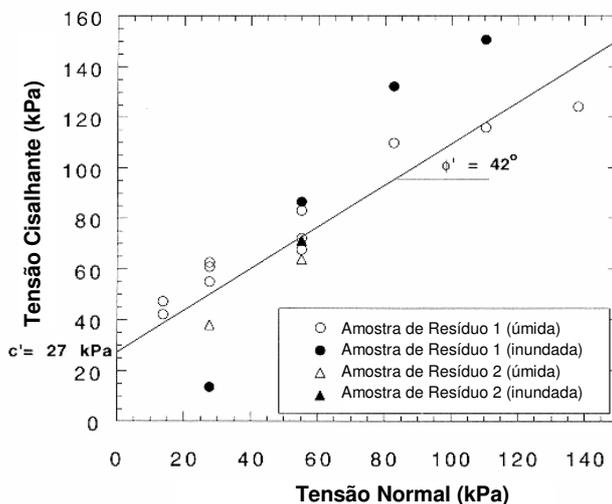


Figura 18 - Envoltória de resistência obtida por cisalhamento direto (Edinçliler *et al.* 1996).

Alguns dos principais aterros sanitários do Canadá já foram alvos de ensaios de cisalhamento direto (e.g. Landva & Clark, 1990), fornecendo amostras para investigações. Pelkey *et al.* (2001) rerepresentaram dados sobre resistência ao

cisalhamento, provenientes de investigações realizadas em alguns destes principais aterros do Canadá, e que foram originalmente publicadas como intercepto coesivo e ângulo de atrito para a tensão cisalhante mobilizada de pico (e.g. Landva & Clark, 1986; Landva & Clark, 1990). Porém, em seu trabalho Pelkey *et al.* (2001) reapresentam os resultados como coesão ou ângulo de atrito mobilizado em função de deslocamentos cisalhantes. Além disto, Pelkey *et al.* (2001) realizaram ensaios de cisalhamento direto com amostras de papel laminado e formulários contínuos, empilhados horizontalmente na caixa cisalhante; e com amostras de papel de computador trituradas, tanto em condições úmidas quanto secas. Adicionalmente, ensaios cisalhamento direto foram executados em amostras fabricadas com os constituintes típicos de resíduos domésticos, incluindo: lascas de pneu, papel picado, lascas de madeira, pedaços de plástico, ração canina para substituir materiais perecíveis, etc... Com os seus resultados, Pelkey *et al.* (2001) concluíram que há uma grande dependência dos parâmetros de resistência mobilizados em função dos deslocamentos cisalhantes. Esta dependência foi maior nas amostras úmidas de papel, sendo mais sensíveis do que as secas. Nos ensaios de cisalhamento simples a resistência de pico somente foi mobilizada em deformações cisalhantes da ordem de 40%. Os parâmetros de resistência mobilizados para 25mm de deslocamento cisalhante foram de  $c = 0 - 50\text{kPa}$  e  $\phi = 11^\circ - 31^\circ$ ,  $c = 0\text{kPa}$  e  $\phi = 21^\circ - 26^\circ$  para as amostras de lixo e papel, nesta ordem, enquanto que a resistência de pico foi de  $c = 0 - 50\text{kPa}$  e  $\phi = 26^\circ - 35^\circ$ ,  $c = 0$  e  $\phi = 21^\circ - 33^\circ$  para as amostras de lixo e papel, respectivamente.

Mais recentemente, Caicedo *et al.* (2002b) investigaram  $c$  e  $\phi$  com uma caixa de cisalhamento de 30cm x 30cm x 20cm e apresentaram dois pares de valores obtidos: 24kPa e 26°; e 59kPa e 17°, respectivamente.

### 3.2.1.2.

#### **Resultados de Ensaios Triaxiais e de Compressão não Confinada**

Jessberger & Kockel (1991) conduziram ensaios triaxiais em RSU com 3 e 7,5 anos de idade, assumindo que o volume da amostra permaneceu constante durante o teste. Nos ensaios, a resistência de pico não foi alcançada em nenhuma das amostras, mesmo para deformações axiais maiores que 20%. Em seguida,

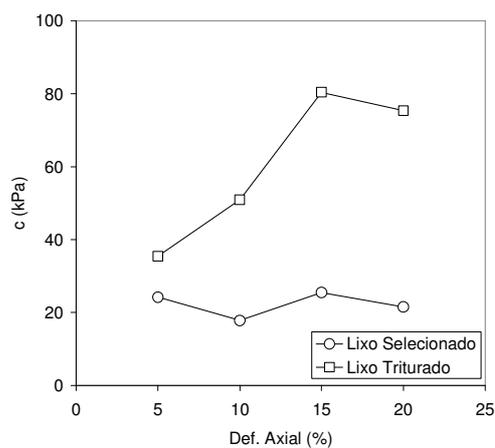
Jessberger & Kockel (1991) realizaram ensaios variando a idade e estado de decomposição do lixo (idades do resíduo entre nove meses e 15 anos). Todavia, os ensaios foram insuficientes para produzir interpretações conclusivas dos resultados.

Jessberger & Kockel (1991) também reportam resultados de ensaios de compressão não confinada em amostras fabricadas de maiores dimensões ( $d=30\text{cm}$ ,  $h=60\text{cm}$ ), com RSU selecionado, moído e tratado. O primeiro tipo de amostra possuía constituintes capazes de suportar tensão (i.e., plástico, têxteis, etc...), enquanto que o segundo tipo era uma mistura heterogênea de materiais com diâmetro máximo de partículas de 15mm. Uma compilação dos resultados reportados está apresentada na Tabela 8, onde há indicação de que a resistência do lixo moído e não moído é diferente, além de mostrar que os dois tipos apresentaram aumento de ângulo de atrito com aumento de deformação axial, contudo o  $\phi$  do resíduo selecionado foi maior para todas as deformações. Adicionalmente, a coesão do resíduo selecionado variou pouco para todos os níveis de deformação, apresentando-se entre 18 e 26kN/m<sup>2</sup>. Por sua vez, a coesão do resíduo moído aumentou em função do nível de deformação até o patamar de 80kN/m<sup>2</sup>. Jessberger & Kockel (1991) também postulam que os parâmetros correspondentes a deformações axiais de 20% para lixo não tratado ( $\phi = 46^\circ$  e  $c = 22\text{kPa}$ ) são similares aos parâmetros de resistência ao cisalhamento apresentados na literatura. A Figura 19 representa graficamente os parâmetros reportados.

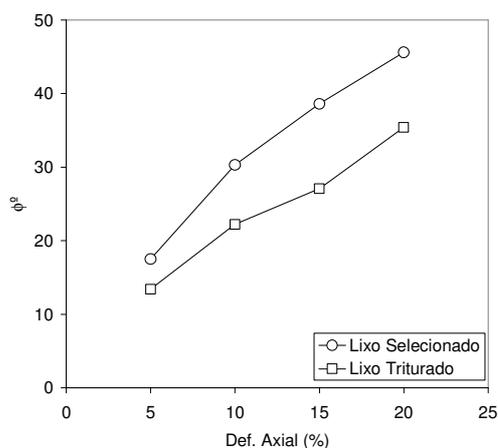
Gabr & Valero (1995) realizaram ensaios triaxiais consolidados não drenados em RSU, com e sem medição de poropressões, em amostras preparadas a partir de tradagens, portanto não sendo representativas de uma certa profundidade, com peso específico seco das mesmas variando entre 7,4 a 8,2kN/m<sup>3</sup>. Os autores observaram que a coesão diminuía à medida que o teor de umidade aumentava. Eles reportam que  $c$  diminuiu em cerca de 100kPa (teor umidade de 55%) para 40kPa (teor de umidade de 70%). Gabr & Valero (1995) também citam que o ângulo de atrito efetivo médio obtido foi de 34° e a coesão efetiva foi de 17kPa, para deformações axiais de 20%.

Tabela 8- Parâmetros de resistência de ensaios triaxiais em resíduo selecionado e moído (adaptado de Jessberger e Kockel, 1991).

Parâmetro	Deformação Axial							
	5 %		10 %		15 %		20 %	
	Selec.	Moído	Selec.	Moído	Selec.	Moído	Selec.	Moído
$\phi^\circ$	17,5	13,4	30,3	22,2	38,6	27,1	45,6	35,4
c (kPa)	24,2	35,4	17,8	50,9	25,5	80,4	21,5	75,4



(a)



(b)

Figura 19 - Parâmetros  $c$  e  $\phi$  de ensaios triaxiais com dois diferentes tipos de resíduo (adaptado de Jessberger e Kockel, 1991).

Em seguida, Jessberger e Kockel (1995) realizaram simultaneamente ensaios de compressão não confinada em amostras de grandes dimensões ( $d=30\text{cm}$ ,  $h=60\text{cm}$ ) e ensaios triaxiais em amostras menores ( $d=10\text{cm}$ ,  $h=20\text{cm}$ ), usando RSU *in natura* e moído, com idades de 1 a 3 anos. Eles observaram apenas pequenas diferenças na resistência entre os dois tipos de amostras empregadas, não sendo possível obter resistência de pico, mesmo em grandes deformações axiais ( $\geq 20\%$ ), como notado na Figura 20.

No mesmo ano, Kockel & Jessberger (1995) conduziram ensaios triaxiais em uma matriz de RSU misturado com quantidades de plástico variadas e idades entre 1 e 3 anos. A matriz para as análises foi obtida pela remoção de elementos de reforço com maiores dimensões da amostra inicial de resíduo, formando uma matriz parecida com um solo, com partículas inferiores a 12cm. A matriz foi, então, triturada em máquina de corte com espessura de lâmina de 15mm. Kockel

& Jessberger (1995) observaram que a resistência ao cisalhamento da matriz foi primordialmente friccional, com  $\phi$  máximo variando entre 42° a 49°, mobilizados a grandes deformações ( $\geq 20\%$ ). Eles também sugerem que a componente coesiva da resistência (41 a 51kPa) foi oriunda dos esforços de tração desenvolvidos nos componentes de reforço, como se o resíduo fosse um solo reforçado.

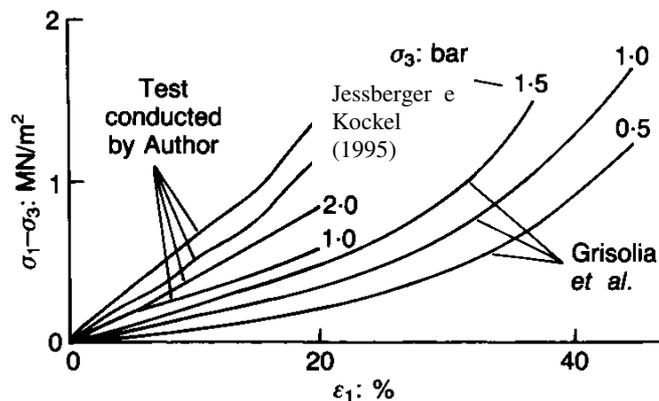


Figura 20 - Comportamento tensão deformação com endurecimento observado em ensaios triaxiais (Jessberger e Kockel, 1995).

Em seqüência, Edincliler *et al.* (1996) projetaram e desenvolveram câmaras triaxiais grandes, para emprego com amostras de lixo com 0,30m e 0,46m de diâmetros e relação  $h/d = 2$  e com possibilidade de aplicação até 280kPa na célula. Todos os detalhes do equipamento estão contidos no trabalho de Edincliler *et al.* (1996). Todavia, a apresentação dos resultados da aplicação prática deste equipamento não foi o objeto do referido trabalho.

Mais recentemente, Caicedo *et al.* (2002b) empregaram uma célula triaxial com 0,30m de diâmetro e 0,6m de altura para investigar as características mecânicas do aterro Doña Juana, na Colômbia. Foi possível observar que a relação *tensão desviadora – deformação* confirma resultados prévios da literatura, ou seja, o material não experimenta ruptura em níveis de até 15% de deformação, apresentando efeito de endurecimento como observado por Jessberger *et al.* (1995) e Grisolia *et al.* (1995), por exemplo.

No Brasil, Vilar e Carvalho (2002) realizaram investigações no ADRSU Bandeirantes em São Paulo, de onde foram retiradas amostras deformadas com cerca de 15 anos de idade para ensaios triaxiais de grandes dimensões. Os espécimes foram moldados posteriormente em laboratório com diferentes energias

de compactação gerando amostras com peso específico de 10, 12 e 14kN/m<sup>3</sup>, e dimensões de 150 e 200mm de diâmetro e 300 e 400mm de altura. Os ensaios triaxiais drenados foram executados com pressões confinantes de 100, 200 e 400kPa.

Mais uma vez, similar a resultados apresentados na literatura, Vilar e Carvalho (2002) obtiveram curvas típicas comportamento *tensão desviadora – deformação axial* como as das Figuras 21(a e b), onde não se atinge resistência de pico e acontece o efeito de endurecimento, possivelmente devido ao efeito de reforço com fibras.

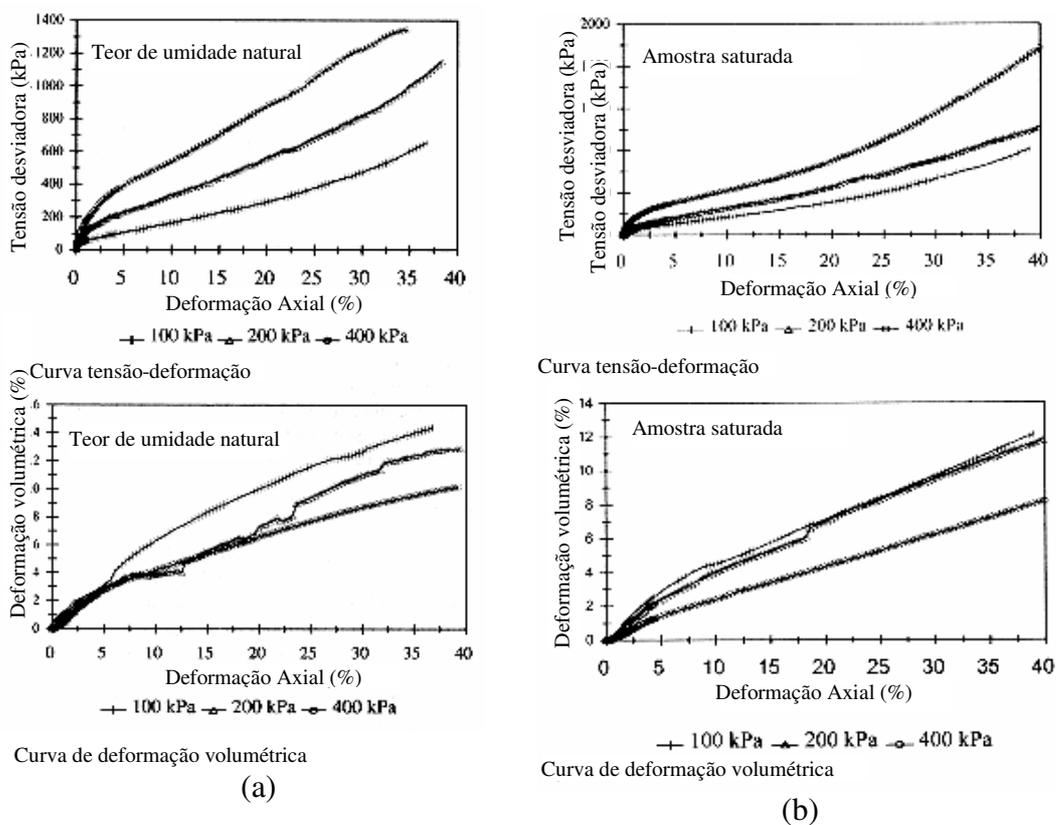


Figura 21- Comportamento tensão-deformação em ensaios triaxiais com RSU (Vilar & Carvalho, 2002).

Ainda, a partir de seus ensaios triaxiais, Vilar e Carvalho (2002) notaram que a diferença entre os pesos específicos utilizados não apresentou grande efeito nos resultados de *c* e *φ* obtidos. A Tabela 9 traz o valor destes parâmetros relativos a deformações de 10%, 20% e 30%, obtidos pelo ajuste dos resultados das três diferentes densidades.

Tabela 9 - Parâmetros de resistência ajustados a diferentes densidades (adaptado de Vilar e Carvalho, 2002).

Deformação (%)	c (kPa)	$\phi$ (°)
10	20,1	21
20	49,4	26,3
30	86,3	30,6

### 3.2.2. Ensaio de Campo em RSU

#### 3.2.2.1. Resultados de Cisalhamento Direto

Gerber (1991) construiu uma caixa de cisalhamento direto com 1,5m x 1,5m de dimensões transversais para emprego em um aterro em *Maine*, US, onde havia ocorrido uma ruptura de talude em RSU, descrita por Richardson & Reynolds (1991). Durante os seis ensaios de grandes dimensões realizados em diferentes pontos, onde as tensões normais foram aplicadas por meio de grandes blocos de concreto e cisalhadas por mecanismos hidráulicos, os valores médios obtidos foram: coesão de 25kPa e ângulo de atrito de 27°. Gerber (1991) observou que grandes deformações são necessárias para mobilizar a resistência do material, bem como, declara ser importante reduzir o valor da resistência ao cisalhamento do resíduo empregado em análises de estabilidade de taludes, para evitar problemas de incompatibilidade de deformações.

Posteriormente, Withiam *et al.* (1995) realizaram ensaios com uma caixa de cisalhamento direto bi partida de aço, com dimensões de 1,5m x 1,5m x 1,5m. A caixa foi colocada sobre um bloco de RSU livre, pouco amolgado, escavado a partir da superfície até a profundidade de 1,5m. As forças horizontais foram aplicadas por meio de cabos e guincho mecânico e as normais através de um sistema de pesos com blocos de madeira e concreto. Os testes foram realizados em três diferentes níveis de tensões normais, variando entre 0 e 21kPa. Os parâmetros reportados foram  $c = 10\text{kPa}$  e  $\phi = 30^\circ$ .

Mais recentemente, após um grande escorregamento no aterro sanitário *Doña Juana* em Bogotá, Colômbia, ocorrido em 1997 (Rodríguez & Velandia, 2002; Caicedo *et al.* 2002a), inúmeras investigações foram realizadas para compreender e caracterizar os fatores condicionantes envolvidos e determinar as

propriedades dos RSU locais. Para este fim, Caicedo *et al.* (2002b) desenvolveram uma caixa de cisalhamento direto de grandes dimensões ( $0,62\text{m}^2$ ) para uso com amostras circulares com 90cm de diâmetro. Nos testes, por meio da aplicação de tensões normais da ordem de 6 até 117kPa, aqueles autores observaram que a resistência de pico foi atingida em deslocamentos da ordem de 60mm (Figura 22a). Com isto, puderam determinar os parâmetros  $c$  e  $\phi$  com valores médios na ordem de 78kPa e  $23^\circ$ , respectivamente (Figura 22b).

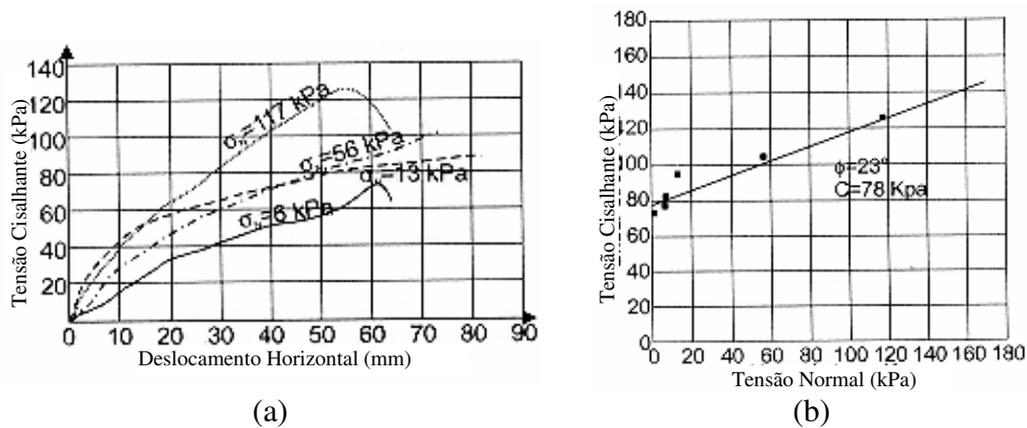


Figura 22 - Resultados de cisalhamento direto no aterro de *Doña Juana* (Caicedo *et al.*, 2002b).

### 3.2.2.2. Outras Metodologias

Siegel *et al.* (1990) realizaram com sucesso nove ensaios de penetração com um cone convencional em um aterro na cidade de Califórnia, EUA, em profundidades que variaram de 4,8 até 37,5m. Os autores descrevem grandes dificuldades operacionais em aterros sanitários, com impossibilidade de penetrações até profundidades pré-definidas (18 casos), quebra de três cones e esmagamento do elemento poroso do cone durante a cravação devido ao contato com elementos mais rígidos dentro do ADRSU. Siegel *et al.* (1990) reportam que, durante a cravação, o cone geralmente encontrava elementos rígidos que produziam picos nas curvas de resistência de ponta medidas, resultando em grande variação nas leituras. Apesar do perfil errático de resistência obtido, foi observada uma tendência de aumento da resistência de ponta com a profundidade de cerca de  $0,8\text{kg/cm}^2/\text{m}$ , na maioria dos casos.

Mitchell & Mitchell (1992) reapresentam resultados de  $c$  e  $\phi$  provenientes de sondagens do tipo SPT ( $c=96\text{kPa}$ ;  $\phi=0^\circ$ ) e palheta ( $c=76\text{kPa}$ ;  $\phi=0^\circ$ ) realizados por Earth Technology Corporation (1988) em um ADRSU na cidade de *Los Angeles*, EUA. Porém, dadas as pequenas dimensões da palheta ( $d=6,35\text{cm}$ ) e a falta de padronização do SPT em RSU, eles indicam que estes resultados não devem ser representativos das condições reais.

Koda (1997) executou uma campanha de ensaios de campo em dois aterros sanitários na Polônia, que incluíram CPT, ensaios similares ao SPT que o autor denominou de WST (*waste sounding test*) e provas de carga em talude com ruptura para retro-análises. Em especial, as sondagens com CPT atingiram profundidades de até 25m e foram realizadas em dois tipos distintos de resíduos: RSU in natura, sem separação prévia; e RSU considerado inerte. As resistências ao cisalhamento oriundas da interpretação destas investigações foram de  $\tau_{fu} = 80\text{kPa}$  e  $\tau_{fu} = 90\text{kPa}$  para o RSU in natura e inerte, respectivamente. Koda (1997) apresenta na Tabela 10 parâmetros de resistência  $c$  e  $\phi$  obtidos em suas investigações.

Tabela 10 - Parâmetros de resistência de aterros na Polônia por investigação direta (Koda, 1997).

<b>Categoria do Lixo</b>	<b>Aterro</b>	<b><math>\gamma</math> (<math>\text{kN/m}^3</math>)</b>	<b><math>\phi</math> (<math>^\circ</math>)</b>	<b>C (<math>\text{kPa}</math>)</b>	<b>Método</b>
Inerte	Radiowo	9,0	20	25	CPT, WST e ensaio de ruptura de talude
Inerte com camadas de areia	Radiowo	12,0	25	23	CPT, WST e ensaio de ruptura de talude
Municipal, velho	Radiowo	14,0	26	20	CPT, WST e retro-análises de escorregamentos
Municipal, novo	Lubna	11,0	21	15	WST e retro-análises de escorregamentos

### 3.2.3. Retro-análises de Ensaios com RSU

Parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos por meio de retro-análises de ensaios de carga e de análises de rupturas assumindo-se valores unitários para o fator de segurança, são apresentados por Howland & Landva (1992) na Figura 23, juntamente com resultados de medições diretas realizadas por Landva & Clark (1990). Naquela figura, o Caso 3 corresponde aos dados de Landva & Clark (1990), o Caso 4 refere-se aos dados de Gerber (1991) e o Caso 1 refere-se à ruptura de um aterro em Nova Jersey, EUA, descrita por Oweis (1985) e Dvirnoff & Munion (1986). A resistência foi retro-analisada por meio de um método de fatias não especificado e os resultados fornecidos como combinações de  $c$  e  $\phi$  correspondentes a um fator de segurança unitário. Por sua vez, o Caso 2 diz respeito a dados de ensaios de carregamento em um aterro na Califórnia descrito por Oweis (1985). A ruptura foi induzida pela colocação de aterro no topo do resíduo e a resposta ao acréscimo de carga monitorada, possibilitando a retro-análise. Pares de  $c$  e  $\phi$  mobilizados, correspondentes ao fator de segurança unitário, foram determinados por um método das fatias não especificado. Finalmente, o Caso 5 concerne ensaios de placas de carregamento conduzidos por Eliasson (1942) em um aterro próximo a cidade Nova York no início da década de 40.

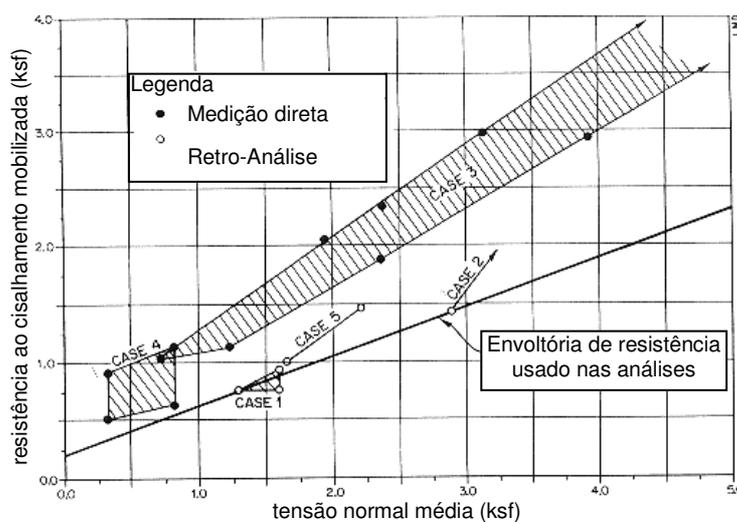


Figura 23 - Parâmetros oriundos de retro-análises em RSU (Howland & Landva, 1992).

Pela análise da Figura 23, Howland & Landva (1992) puderam abstrair duas conclusões importantes. Primeiro, que a resistência ao cisalhamento de RSU é prioritariamente de natureza friccional, isto é, a resistência ao cisalhamento aumenta com a tensão normal. Segundo, que os valores de resistências obtidos por retro-análises são menores do que os determinados por medições diretas. Howland & Landva (1992) acreditam que esta diferença pode ser causada pelos materiais fibroso constituintes que geram um grande impacto na resistência de amostras pequenas ou pela influência de uma fundação pouco resistente. Outras possíveis explicações, segundo os autores, são que as deformações no campo não foram suficientemente grandes para mobilizar a total resistência do resíduo ou, mesmo, que a ruptura progressiva influenciou a resistência ao cisalhamento média obtida pela retro-análise.

Pagotto & Rimoldi (1987) reportam ensaios de capacidade de carga com placas em um ADRSU em Modena, Itália, onde encontraram coesão de 29kPa e ângulo de atrito de 22°.

Kavazanjian *et al.* (1995) apresentam ângulos de atrito referentes à quatro aterros nos Estados Unidos, calculados por meio do método das fatias modificado de Bishop, assumindo coesão de 5kPa, que variaram entre 25° a 38°. Os taludes destes aterros permaneceram sem ruptura por cerca de 15 anos, sem deformações excessivas ou outros sinais de instabilidade, o que levou a crer que possuíam fatores de segurança (FS) superior a unidade. Portanto, nas suas retro-análises Kavazanjian *et al.* (1995) assumiram FS = 1,2.

Kavazanjian *et al.* (1995), baseados em observações nos resultados de Howland & Landva (1992) e em outros diversos dados, sugeriram que a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb apropriada para RSU consistia de  $\phi = 0^\circ$  com  $c = 24\text{kPa}$  para tensões normais inferiores a 30kPa, e  $\phi = 33^\circ$  com  $c = 0$  para tensões normais superiores a 30kPa.

### **3.3. Resistência a Deformabilidade de RSU**

As referências encontradas a respeito de parâmetros de deformabilidade são escassas e algumas delas baseadas em técnicas de investigações geofísicas que

fornecem parâmetros dinâmicos que, por sua própria natureza de obtenção, devem servir de comparação cautelosa com esta pesquisa. Outras referências fornecem informações sobre investigações estáticas para determinação dos parâmetros, como é o exemplo do emprego de pressiômetros. Estas referências parecem fornecer uma base comparativa mais aceitável para este Tese.

### 3.3.1. Parâmetros de Deformação em RSU por ensaios dinâmicos.

Faz-se uso do módulo cisalhante, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dinâmicos quando se quer compreender o comportamento do RSU frente a cargas dinâmicas como as oriundas de maquinário vibrante, explosões e terremotos. Para a obtenção destes parâmetros, empregam-se ensaios de laboratório, como compressão triaxial cíclico, cisalhamento simples cíclico e de coluna ressonante, ou ensaios de campo, como os métodos de propagação de onda (cross-hole, up ou down-hole) e refração de onda (Sharma *et al.*, 1990).

Sharma *et al.* (1990) reportam o emprego da técnica sísmica de cross-hole em um aterro de resíduos da cidade de *Richmond*, Califórnia, para determinação de parâmetros de deformabilidade. A técnica sísmica usada está ilustrada no esquema apresentado na Figura 24 onde as velocidades de propagação de ondas cisalhantes e compressivas são medidas em função do tempo requerido para um pulso sísmico percorrer a distância da superfície (origem) até o um geofone posicionado em profundidade, em um furo de sondagem. Desta maneira, o módulo cisalhante dinâmico ( $G_d$ ,  $G_0$  ou  $G_{max}$ ) do material investigado (p.ex. solo, rocha ou RSU) pode ser obtido por meio de sua densidade e velocidade de propagação de onda cisalhante no ambiente pela Equação 23.

$$G_d = V_s^2 \cdot \rho \quad \dots(23)$$

em que,

$G_d$ – módulo cisalhante análise dinâmica	(F/L <sup>2</sup> )
$V_s$ – velocidade da onda cisalhante	(L/T)
$\rho = \gamma / g$ – densidade	(M/L <sup>3</sup> )
$\gamma$ – peso específico	(F/L <sup>3</sup> )
$g$ – aceleração da gravidade	(L/T <sup>2</sup> )

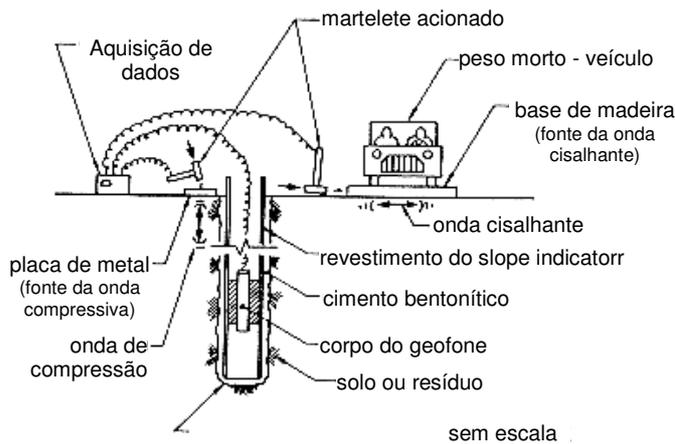


Figura 24– Esquema simplificado da técnica de cross-hole.

Através das relações entre  $G$  e  $E$  advindas da Teoria da Elasticidade, pode-se obter o módulo de elasticidade dinâmico do material por:

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \nu_d)} = V_s^2 \cdot \rho \quad \dots(24)$$

em que:

$E_d$  – módulo elasticidade análise dinâmica  $(F/L^2)$

$\nu_d$  – coeficiente de Poisson análise dinâmica  $(L/T)$

Pode-se, ainda, relacionar o módulo de elasticidade do material com sua densidade, velocidade de propagação de onda de compressão e coeficiente de Poisson, com:

$$E_d = V_c^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu_d) \cdot \frac{(1 - 2\nu_d)}{(1 - \nu_d)} \quad \dots(25)$$

em que,

$V_c$  – velocidade da onda de compressão  $(L/T)$

Combinando-se as Equações 24 e 25, tem-se a expressão para obtenção do coeficiente de Poisson em função das velocidades de propagações advindas do ensaio geofísico (Equação 26):

$$v_d = \frac{(V_c^2 - 2V_s^2)}{2(V_c^2 - V_s^2)} \quad \dots(26)$$

As velocidades observadas por Sharma *et al.* (1990) nos ensaios de campo do tipo *cross-hole*, bem como os parâmetros calculados, estão descritos na Tabela 11. O peso específico médio do resíduo nos cálculos foi estimado em 737kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 11– Velocidades de propagação e respectivos parâmetros obtidos pela técnica de *cross-hole* (Sharma *et al.* 1990).

Prof. m	$V_s$ m/s	$V_c$ m/s	$G_0$ MPa	$E$ MPa	$\nu$ -
0 – 15,3	198,3	716,8	28,9	84,4	0,45

Similarmente, Singh & Murphy (1990) reportam resultados de investigações nos aterros *Puente Hill* (Earth Technology, 1988), *Richmond* e *Redwood* (EMCON, 1989), cujas velocidades cisalhantes foram as seguintes: 287m/s e 213m/s (camadas com 6 a 23m) e 91m/s (camada inicial de 0 a 6m).

Kavazanjian *et al.* (1994) citam perfis de velocidade de propagação de ondas cisalhantes derivados de medições de onda Rayleigh (onda de superfície) realizados em oito aterros de resíduos na Califórnia. As campanhas produziram variações de  $V_s$  da ordem de 80m/s próximo da superfície e 300m/s na profundidade de 30m.

Kavazanjian *et al.* (1995) descrevem resultados de campanhas de investigações de onda cisalhante pela técnica de *cross-hole* realizados em Los Angeles (aterro de *Puente Hill*) por Earth Technology (1988) e em Nova York (aterro de *Brookhaven*) por Carey *et al.* (1993). No primeiro trabalho, as velocidades cisalhantes obtidas variaram de 240m/s a 270m/s nas profundidades respectivas de 6m e 14m, enquanto que no segundo a variação foi de 185 a 478m/s. Todavia, as profundidades deste último trabalho não são reportadas.

Igualmente, Houston *et al.* (1995) realizaram ensaios do tipo *down-hole* em um aterro de RSU, que também recebe entulhos de construção e de poda, e obtiveram os resultados médios apresentados na Tabela 12.

Tabela 12- Velocidades de propagação e respectivos parâmetros obtidos pela técnica de down-hole (Houston *et al.* 1995).

Prof. (m)	Vc (m/s)	Vs (m/s)	Vc/Vs	$\nu$	$G_0$ (MPa)	E (MPa)
1,52	235	124	1.89	0,30	16,1	42,0
3,05	255	143	1.78	0,27	21,4	54,2
4,47	273	161	1.70	0,23	27,0	66,5
6,10	300	184	1.63	0,20	35,0	84,1
7,62	311	198	1.57	0,16	40,8	94,8
10	346	229	1.51	0,11	54,7	121,3

Mais recentemente, Pereira *et al.* (2002) reportam ensaios sísmicos no aterro de *Valdemingómez*, na Espanha, onde a velocidade de onda cisalhante foi medida até a profundidade de 35m, tendo o seu valor variando entre 210m/s a 100m/s, até o primeiro metro de profundidade, e de 100m/s a 250m/s, à profundidade de 1 a 31m. Empregando a Equação 22, Pereira *et al.* (2002) obtiveram uma variação de 7,2MPa a 31MPa para o módulo cisalhante máximo ( $G_0$ ), utilizando uma densidade de 500kg/m<sup>3</sup>.

A partir dos dados sobre velocidades cisalhantes da literatura e apresentados anteriormente, determinaram-se os módulos cisalhantes  $G_0$  por meio da aplicação da Equação 23, desde que se tenha conhecimento da densidade ou peso específico do lixo. O resultados encontrados, ilustrados em termos de  $G_0$  x *profundidade*, estão apresentados na Figura 25. Nos cálculos, quando não se tinha conhecimento sobre  $\gamma$ , empregou-se valores entre 700 e 1000kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.2.

#### Parâmetros de Deformabilidade de RSU por ensaios estáticos.

Sánchez-Alciturri *et al.* (1995) postulam que o ensaio de placa pode ser usado como metodologia de análise da deformabilidade em aterros. Porém, em alguns casos este teste é realizado na camada de solo de cobertura sobrejacente ao lixo. No caso do ensaio ser executado diretamente sobre a camada final, cuja espessura é da ordem de 0,5 a 1,0m, o uso de uma placa de maiores dimensões se justifica. Por outro lado, se o ensaio for realizado sobre a camada de proteção diária, com cerca de 0,10 a 0,40m, placas de menores dimensões podem ser

empregadas. De uma forma ou de outra, a pressão aplicada deve vencer a pressão de punção do solo para, então, atingir o resíduo e produzir os resultados procurados. O processo envolve um estágio inicial elástico até o punção da camada de cobertura, seguido de outro trecho linear, representativo da deformação somente do resíduo para o acréscimo de pressão. Segundo Sánchez-Alciturri *et al.* (1995) a pressão de punção de uma camada de solo como a da Figura 26 pode ser dada pela Equação 27.

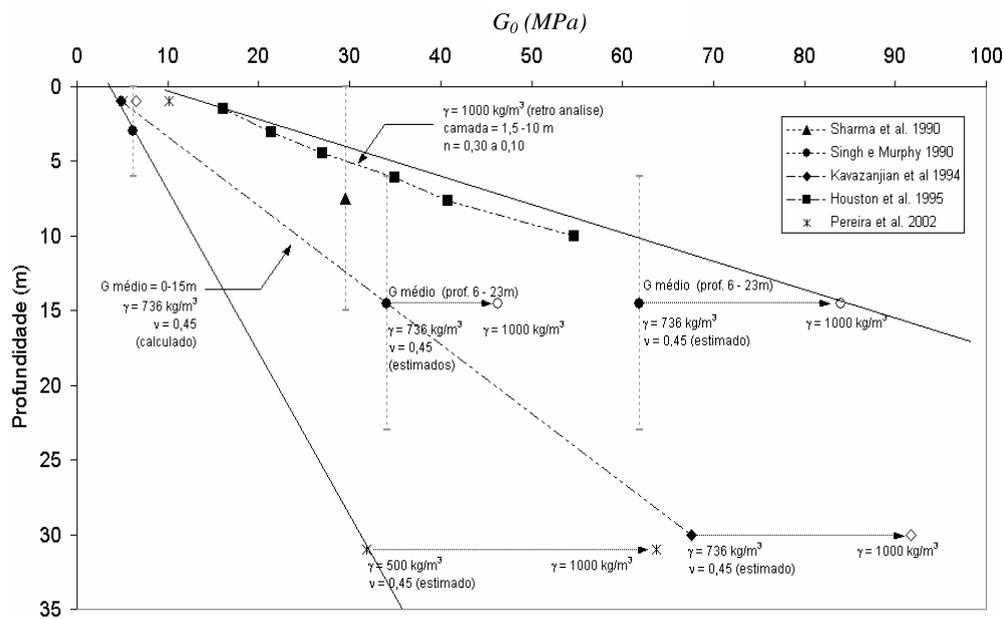


Figura 25 – Faixa de valores de \$G\_0\$ obtidos a partir de ensaios geofísicos

$$P_p = s_u \cdot \frac{\left(1 + 2 \cdot \tan \alpha \cdot \frac{D}{B}\right)^2}{\tan \alpha \cdot \left(1 + \tan \alpha \cdot \frac{D}{B}\right)} \quad \dots(27)$$

em que \$S\_u\$ é a resistência da camada de argila de cobertura e \$D\$, \$B\$ e \$\alpha\$ são a espessura da camada, o diâmetro da placa e a inclinação de uma cunha até o limite de influencia da carga.

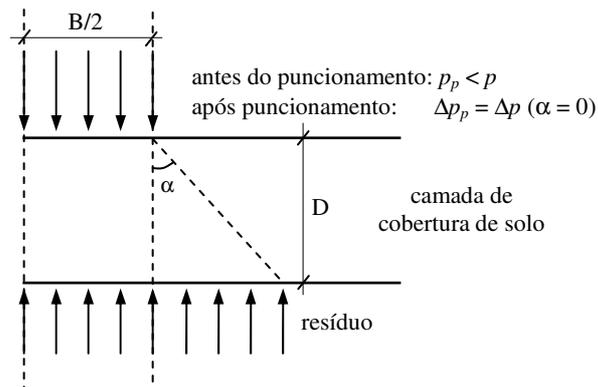


Figura 26- Definições para determinação da pressão de puncionamento

Após atingir-se a resistência do solo, todo o carregamento é transmitido ao resíduo. Nestas condições, a lei governante é dada por:

$$\Delta p = \frac{E_w}{1 - \nu_w^2} \cdot \frac{\Delta s}{B} \quad \dots(28)$$

em que  $E_w$  – módulo de *Young* do lixo;  $\nu_w$  – coeficiente de *Poisson* do lixo;  $\Delta s$  – recalque;  $B$  – diâmetro da placa.

O módulo de *Young* ( $E_w$ ) obtido por Sánchez-Alciturri *et al.* (1995) no aterro de *Meruelo*, na Espanha, empregando ensaios de placa de carga em resíduo sem cobertura, esteve na faixa de 1 a 2MPa. Contudo, o coeficiente de *Poisson* empregado nos cálculos não foi discriminado.

Por sua vez, no mesmo ano Jessberger & Kockel (1995) apresentaram resultados de módulos de rigidez ( $E_s = \Delta\sigma/\Delta\epsilon$ ) derivados de diferentes testes da literatura, bem como, alguns advindos de seus ensaios com células de compressão de 1000mm, onde  $E_s$  foi determinado para cada passo de carga e sua respectiva deformação. A Figura 27 transcreve as informações descritas por Jessberger & Kockel (1995).

Koda (1997) reporta valores médios de módulo de rigidez, obtidos a partir de retro-análises de rupturas induzidas de taludes no aterro de *Radiowo*, Polônia, da ordem de 0,8 a 1,2MPa para resíduos sólidos com materiais inertes na faixa de 1,1MPa para RSU inertes, com camadas de areia.

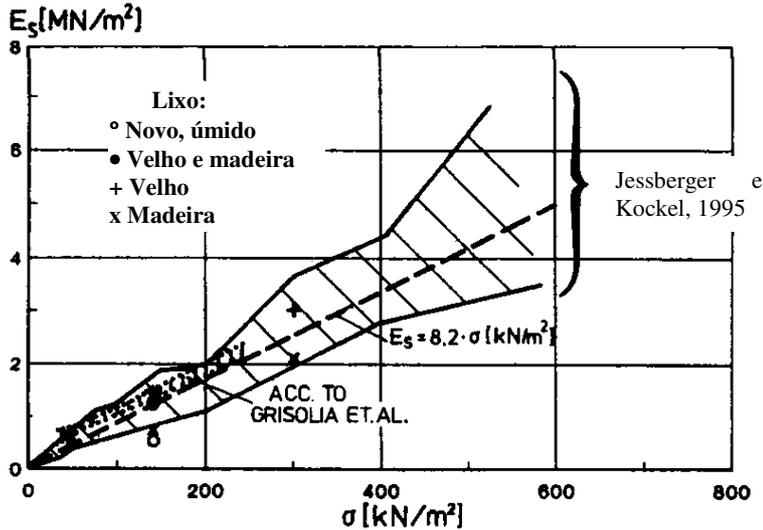


Figura 27- Análise comparativa entre alguns módulos de rigidez disponíveis na literatura (Jessberger & Kockel, 1995).

### 3.3.2.1. Investigações com Pressiômetros em RSU

A experiência relatada na literatura sobre a utilização de pressiômetros para investigar RSU é escassa. Cartier & Baldit (1993) reportam uma campanha de ensaios de campo em um aterro de RSU na França, onde foi empregado um pressiômetro de Ménard até a profundidade de 20m para determinar o módulo de elasticidade de Ménard ( $E_m$ ). Os pré-furos eram executados com lavagem e revestidos, empregando-se um tubo ranhurado longitudinalmente na profundidade teste para proteção da membrana. Pelo ajuste dos valores de módulo Cartier & Baldit (1993) indicam uma variação de  $E_m(\text{kPa}) = 1000 + 1000 a 1500 \cdot z(\text{m})$ .

Posteriormente, Dixon & Jones (1998) e Dixon *et al.* (1999) justificam o emprego de um pressiômetro comercialmente disponível pela empresa Inglesa *Cambridge Insitu* na investigação de RSU, pois:

- O equipamento mede tensões médias atuantes na membrana e, portanto, qualquer grande variação em tensão devido à natureza heterogênea do resíduo representará um valor médio;
- Deformações relativamente grandes podem ser alcançadas, tipicamente da ordem de 10 – 15% com o equipamento padrão. Medição do comportamento em grandes deformações é importante devido à alta

compressibilidade do material e do comportamento de pré-ruptura com endurecimento que tem sido observado em laboratório (Jessberger & Kockel, 1995);

- Ensaios pressiométricos envolvem um volume relativamente grande de material em cada teste, o que é desejável devido à natureza variável do meio estudado. Ensaios em solos têm indicado que materiais distantes até 40 vezes o diâmetro do pressiômetro podem vir a influenciar o ensaio (Clarke, 1995).

No caso de RSU, dadas as suas características peculiares, ainda há incertezas quanto à melhor técnica de instalação do pressiômetro, que produza o mínimo de amolgamento. Por isso, Dixon & Jones (1998) e Dixon *et al.* (1999) indicam quatro procedimentos em potencial para a instalação da sonda em aterros de RSU:

- i. Um PAP pode ser empregado, formando um furo desde a superfície até a profundidade requerida. O furo não é revestido valendo-se da natureza “reforçada” do resíduo para a prevenção do colapso acima da sonda. Este método deve produzir o menor distúrbio e não requer outro tipo de equipamento no local (p.ex. sonda rotativa);
- ii. Caso o método com PAP funcione sob taxas muito pequenas de avanço, então, é preferível formar o furo com uma sonda rotativa e, então, instalar o pressiômetro por autoperfuração a partir da base do furo escavado;
- iii. Se a técnica autoperfurante não funcionar satisfatoriamente para certos resíduos, então, um método alternativo é formar o furo como descrito no item (ii) e, subseqüentemente, formar uma cavidade por meio de trado de mesmo diâmetro que a sonda. Um PPF é então inserido nesta cavidade e o teste executado;
- iv. Uma metodologia alternativa é a cravação do pressiômetro no resíduo, a partir da superfície ou da base de um pré-furo. Instrumentos do gênero, que resultam no completo deslocamento do material, são conhecidos como pressiômetros de deslocamento total (*full displacement pressuremeter*), sendo atualmente o mais comumente disponível o Cone Pressiômetro. Devido ao fato do material ao redor do instrumento ser amolgado pelo

processo de inserção, é comum aos PC's a capacidade de grandes deformações, isto é, a membrana pode ser expandida até grandes diâmetros, deformando um volume maior de material e incluindo o solo não amolgado.

Apesar das propostas, Dixon & Jones (1998) ressaltam que mesmo através do emprego de um dos quatro métodos descritos, pode ser, ainda, necessário abandonar algumas locações teste devido à presença de obstruções, i.e. materiais impenetráveis.

O sítio reportado por Dixon & Jones (1998) para realizar investigação com um pressiômetro autoperfurante foi o aterro *Calvert*, próximo a Londres, cuja operação teve início em 1980, recebendo somente resíduos urbanos. A profundidade máxima das células é de 20m, com cada célula levando de um a dois anos para fechamento. O RSU é tipicamente disposto em camadas de 1m (máximo duas) e compactado estaticamente, possuindo camadas de proteção de argila com 0,3 a 0,5m de espessura e camada de cobertura final de argila com 1 a 2m de espessura.

Os ensaios foram realizados empregando-se a metodologia (ii) descrita anteriormente, tanto em resíduo recente (1 – 3 anos), em profundidades de 3,5 a 10,7m abaixo da superfície, quanto em um resíduo parcialmente degradado (11 anos) em profundidade de 11,7m. Posteriormente, o método (i) foi utilizado usando um PAP, operado desde a superfície, em resíduo com 2 anos de idade e profundidade 1,7 a 3,5m. A curva pressiométrica de um dos ensaios está reproduzida na Figura 28.

Como não há atualmente metodologias de interpretação de ensaios pressiométricos específicas para RSU, Dixon & Jones (1998) empregaram a metodologia corrente para solos e rochas na obtenção do parâmetro de rigidez  $G$ , através de ciclos de descarregamento e re-carregamento da curva *pressão x deformação*. Além disto, para avaliar a tendência de variação de  $G$  com a profundidade, utilizaram os resultados dos ciclos que foram gerados em diferentes níveis de deformação e tomaram como referência um valor de deformação específico (p.ex. 1%). Para tanto, em um dado ensaio uma relação aproximadamente linear foi encontrada entre  $G$  (ciclos) e deformação. Esta linha foi, então, empregada para obter o módulo cisalhante referente a 1% de

deformação da cavidade. A Figura 29 mostra a variação de  $G$  obtido a 1% de deformação em função da profundidade.

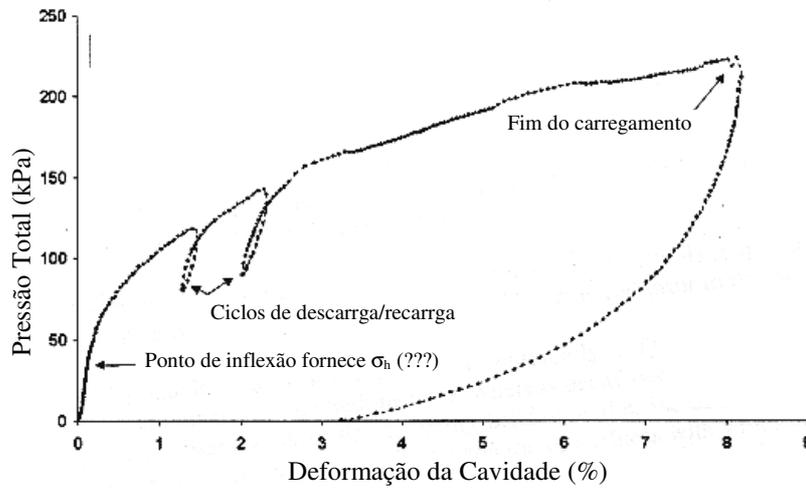


Figura 28 - Curva pressiométrica de um PAP em RSU (Dixon *et al*, 1999).

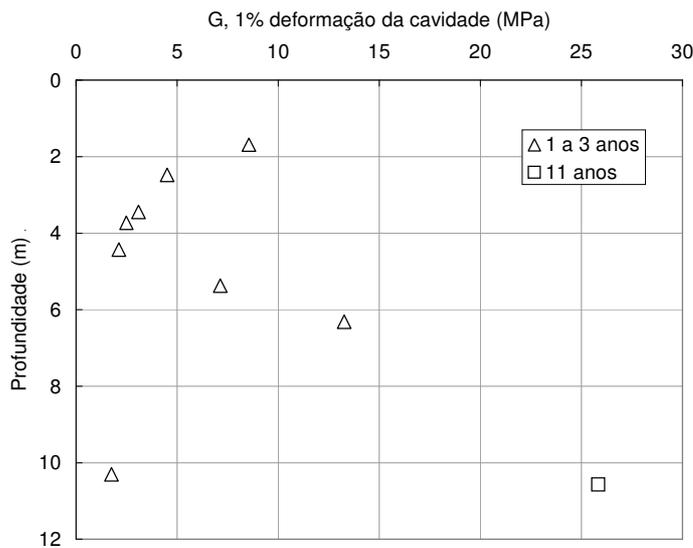


Figura 29 – Módulo cisalhante de RSU através de PAP, a 1% de deformação da cavidade (Dixon e Jones, 1998)

Os autores ressaltam que houve um decréscimo do módulo até a profundidade de 4,5m e posterior acréscimo do mesmo, com exceção do ponto referente à profundidade de 10,7m (talvez por erros operacionais). Dixon & Jones (1998) justificam o comportamento inicial pelo efeito de formação da camada de cobertura. A compactação durante a disposição e operação do aterro é mais branda do que a empregada durante a formação da camada superior final, com 1 a 2m de

espessura, que deve ser bastante impermeável. Desta forma, tende-se a ter camadas superficiais dos aterros mais compactas, camadas intermediárias ainda sofrendo o efeito da degradação e recalque e camadas mais profundas, com decomposição avançada e baixo índice de vazios, influenciando, desta forma, no valor de módulo cisalhante obtido.

Dixon & Jones (1998) apresentam, também, uma análise comparativa entre os módulos de deformação obtidos de sua campanha com o PAP e outros disponíveis na literatura (Figura 30). Estes englobam informações de módulos de *Young* ( $E$ ) obtidos por meio de ensaios laboratoriais triaxiais, bem como, módulos de compressão volumétrica ou edométricos ( $D$ ) provenientes tanto de ensaios laboratoriais de pequena escala quanto de grande escala, além de investigações de campo, e geram uma faixa limite de valores de módulo x tensão.

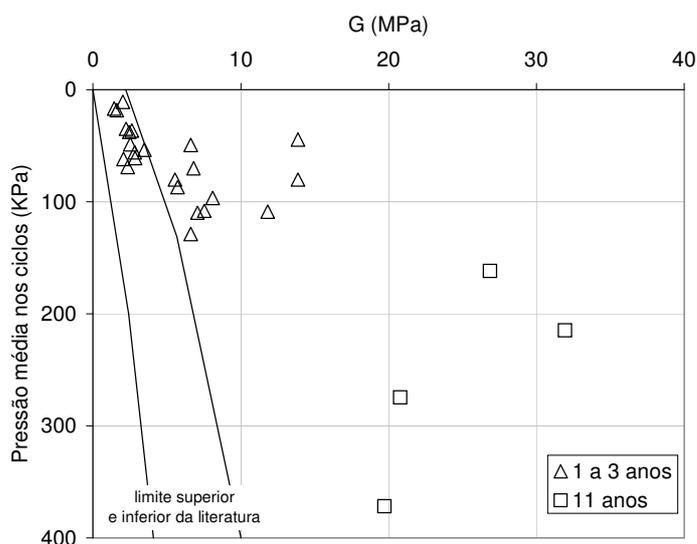


Figura 30 – Análise comparativa entre  $G$  disponíveis na literatura (Dixon e Jones, 1998).

Posteriormente, Dixon *et al.* (2000) deram prosseguimento às investigações no aterro de Calvert com o PAP e reportaram adicional uso de um PPF. Para o caso descrito, foi utilizado o *High Pressure Dilatometer* (HPD) da *Cambridge Insitu* (<http://www.cambridge-insitu.com>). Além destes pressiômetros, Dixon *et al.* (2000) empregaram PC nas investigações, porém reportam apenas uma análise crítica qualitativa sobre o emprego de PC em RSU, pois os dados ainda estavam em fase de interpretação. Uma curva *pressão-deformação da cavidade*,

representativa do ensaio com o cone pressiômetro usado está apresentada na Figura 31 para fins de comparação com o resultado da Figura 30.

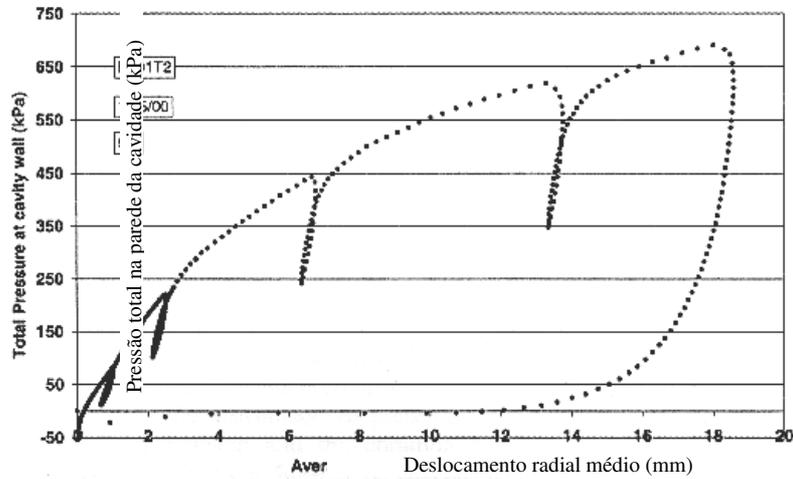


Figura 31 - Curva pressiométrica de um PC em RSU (Dixon *et al.*, 2000).

## **4 Desenvolvimento do Pressiômetro de Cravação**

### **4.1. Introdução**

Este capítulo apresenta o pressiômetro de cravação para RSU (PC-RSU) desenvolvido nesta pesquisa e seus componentes, abordando os estudos realizados nas etapas de projeto, procedimentos de montagem, etapas e metodologia de calibrações realizadas e demais informações técnicas pertinentes.

O desenvolvimento e montagem do equipamento desta pesquisa tiveram a sua origem na parceria entre as universidades de *Newcastle upon Tyne*, Reino Unido, e PUC-Rio por intermédio de doutorado sanduíche subsidiado pela CAPES. A concepção de projeto e construção parcial das sondas e equipamentos auxiliares foi executada na Inglaterra, enquanto que as etapas de montagem, calibração e aplicação prática foram realizadas no Brasil, na PUC-Rio, com o apoio financeiro do PRONEX/CNPq.

### **4.2. Estudos de Projeto do PC-RSU**

#### **4.2.1. Fundamentos da Instrumentação da Sonda**

Atualmente a maioria dos pressiômetros comercialmente em uso baseia-se na medição de deslocamentos radiais ou diametrais da membrana para determinação da deformação da cavidade, sejam elas tomadas em um único ou em vários pontos ao longo da circunferência ou do comprimento da sonda. Esta prática veio minimizar algumas dificuldades operacionais com o emprego de líquidos e óleos na expansão da membrana e possibilitou a avaliação da real deformação da cavidade, além de propiciar maiores resoluções nas leituras. Portanto, similar ao estado da arte da instrumentação em sondas pressiométricas, optou-se pela concepção de um sistema de medições similares aos preexistentes

durante a fase inicial do projeto do pressiômetro de cravação na Inglaterra, isto é, baseado na medição de deslocamentos ao contrário de variações volumétricas.

Estes tipos de sistemas de medição têm sido historicamente concebidos empregando-se sensores de deslocamentos ou deformação posicionados na circunferência e/ou longitudinalmente ao longo da sonda em maior ou menor quantidade (e.g Withers *et al.*, 1986; Clarke & Allan 1989; Benoit *et al.*, 1990; Fahey & Jewell, 1990; Allan, 1992; Akbar, 2001). Desta forma, é possível, inferir a real variação diametral da cavidade em função da heterogeneidade do meio investigado. Para este fim, empregam-se usualmente *strain gauges* ou ainda transdutores de efeito Hall (*Hall Effect Transducers* - HET), associados a pequenos braços ou placas que são movimentadas pela expansão/contração de molas que são dispostas de tal forma que o movimento da membrana flexível é acompanhado pelo conjunto e medido corretamente. Similarmente, o emprego de LVDT's (*Linear Variable Differential Transducers*) é possível, porém mais oneroso devido ao seu custo comparativamente mais elevado, além de ocupar mais espaço dentro do corpo da sonda. A Figura 32 apresenta alguns sistemas de medições de deslocamentos radiais encontrados em pressiômetros e disponíveis na literatura.

Deformações radiais máximas da cavidade cilíndrica da ordem de 40% a 50% podem ser obtidas com estas configurações e são perfeitamente suficientes para fornecer eficientemente as características de resistência de vários tipos de solos e rochas brandas (Clarke, 1996). Todavia, para utilização em RSU estes níveis de deformações podem não ser suficientes para se obter a completa relação tensão-deformação de RSU. Resultados de análises *in* e *ex situ* de compressão uni e triaxial e de cisalhamento direto, como os observados na Figura 33, mostram que não se atinge ruptura mesmo para valores de deslocamento cisalhantes altos (40 a 50mm).

Como abordado anteriormente, uma das hipóteses no emprego da teoria da expansão de cavidade em ensaios pressiométricas é de que a relação entre o raio inicial e o raio final da expansão seja próximo da unidade (Schnaid, 2000). Também, a relação comprimento-diâmetro (L/D) para pressiômetros de cravação deve ser de aproximadamente 10 (Withers *et al.*, 1986). Portanto, para atingir deslocamentos radiais superiores à 60mm, as sondas pressiométricas teriam que

ter dimensões muito elevadas em comprimento e diâmetro, demandando sistemas de cravação com reações maiores e hastes mais robustas do que o padrão.

Considerando estes fatores, nesta pesquisa tentou-se adaptar sistemas de medição de deslocamentos em pressiômetros que pudessem chegar a valores de deformação maiores do que os usuais. Normalmente para PC os deslocamentos radiais são da ordem de 1,5 a 2cm e as deformações mínimas indicadas de 15%. Portanto, o objetivo inicial foi de projetar um sistema que fosse capaz de medir deslocamentos radiais da membrana de até 5cm, sem comprometer a relação L/D dos PC ( $L/D \approx 10$ ).

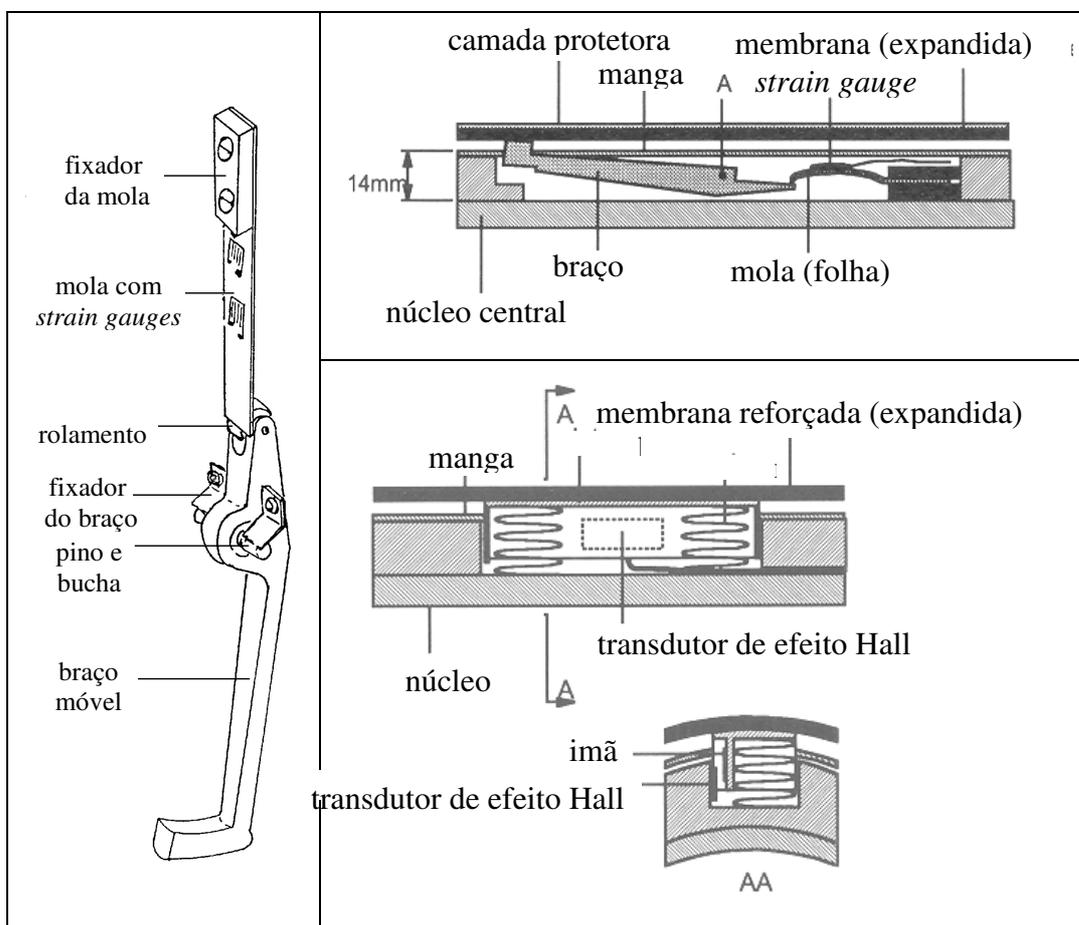


Figura 32 - Sistemas de medições de deslocamentos em pressiômetros.

Além disto, devido à grande heterogeneidade de materiais encontrados em aterros sanitários, é interessante obter leituras referentes a pontos distintos ao longo do comprimento da sonda, e em diferentes direções. Com isso pode-se, quando necessário, descartar uma ou outra leitura referente a um ponto onde haja deslocamentos desprezíveis, possivelmente oriundos do contato com objeto mais

sólido encontrado no interior do aterro; ou ainda, pode-se obter um valor médio de deformações referentes às diferentes profundidades e direções e extrapolar para uma expansão cilíndrica de cavidade, aplicando, assim, a teoria matemática cabível. De uma forma ou de outra, leva-se em conta a heterogeneidade e anisotropia do meio.

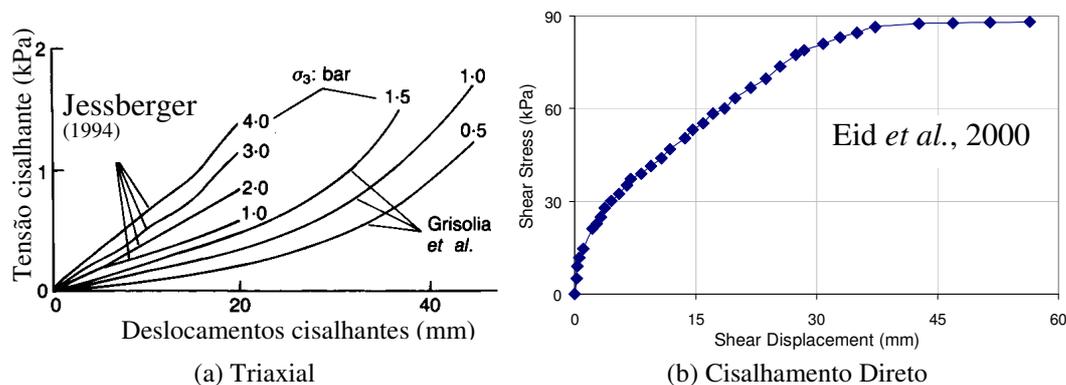


Figura 33 - Relações tensão-deslocamento em ensaios com RSU.

Em contrapartida, o uso de medidores de deslocamentos pontuais associados ao emprego de pressiômetro em um ambiente tão heterogêneo como os ADRSU, traz uma desvantagem implícita. Com este tipo de sistema de medições é difícil identificar deformações pontuais exageradas da membrana causadas por contato com zonas de fraqueza, como vazios, podendo levar a ruptura da membrana nestes casos. A Figura 34 ilustra esta possibilidade. Neste caso, os transdutores poderiam indicar valores de deformações aceitáveis enquanto que, na realidade a membrana pontualmente estaria prestes a alcançar limites de escoamento.

#### 4.2.2. Sensor de Deslocamento Empregado

Para a medição dos deslocamentos optou-se pelo uso de sensores do tipo HET (*Hall Effect Transducers*), pois estes apresentam vida útil elevada (30 bilhões de operações), alta velocidade operacional (até 100kHz), excelente repetibilidade, e, ainda, não possuem partes móveis e seu custo é bastante reduzido (£10 - £12). O princípio destes transdutores é bastante simples e baseado na descoberta de Edwin Hall em 1879, quando percebeu que uma diferença de potencial era gerada do lado oposto de uma pequena placa de ouro energizada por

uma baixa corrente elétrica, quando esta era submetida a um fluxo magnético perpendicular proveniente de um ímã (Honeywell, 2002). Descobriu-se, então, a relação proporcional entre o fluxo de corrente no condutor e o fluxo magnético perpendicular a este.

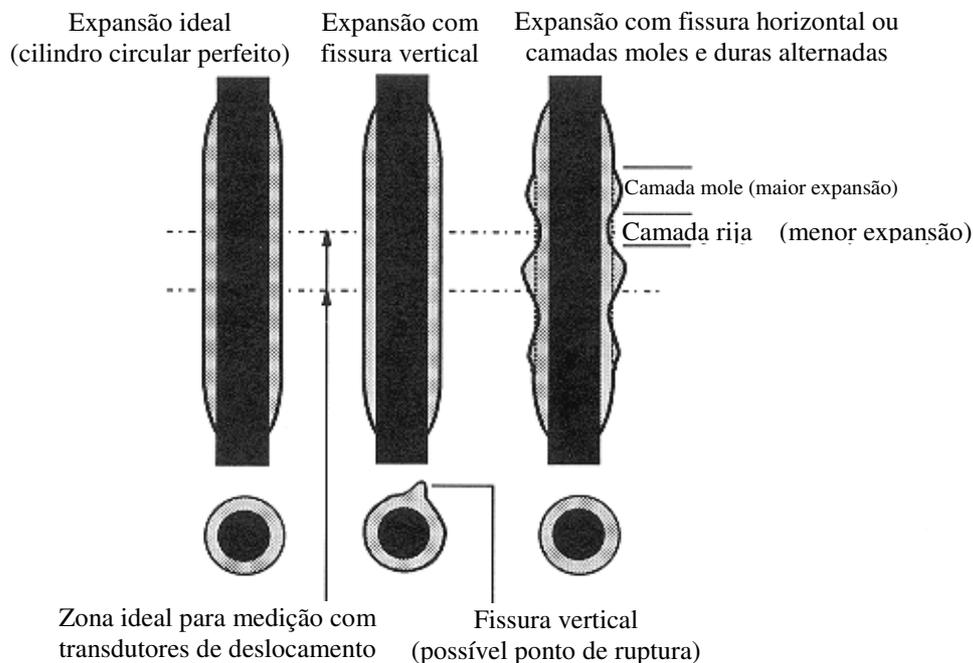


Figura 34 - Fatores intervenientes na ruptura da membrana pressiométrica.

O elemento Hall é construído a partir de uma folha fina de material condutor com os conectores de saída perpendiculares à direção do fluxo de corrente. A resposta proporcional de variação de voltagem é bastante pequena ( $\mu\text{V}$ ) e requer amplificação para níveis de voltagem usuais. Todavia, apesar da essência dos HET's ser medição de variação do campo magnético, a sua aplicação abrange outros tipos de dispositivos sensores destinados a medir variações de corrente, temperatura, pressão, posição, etc..., por meio de conversão das curvas de calibrações, da variação do sinal eletrônico em sinais que atendam a demanda de medição.

Os sensores empregados nas análises a seguir são do tipo LOHET II (*Honeywell Microswitch*), adquiridos junto a *RS Components Limited* (nº série RS 650-548). A Figura 35 fornece um detalhe e uma foto do sensor.

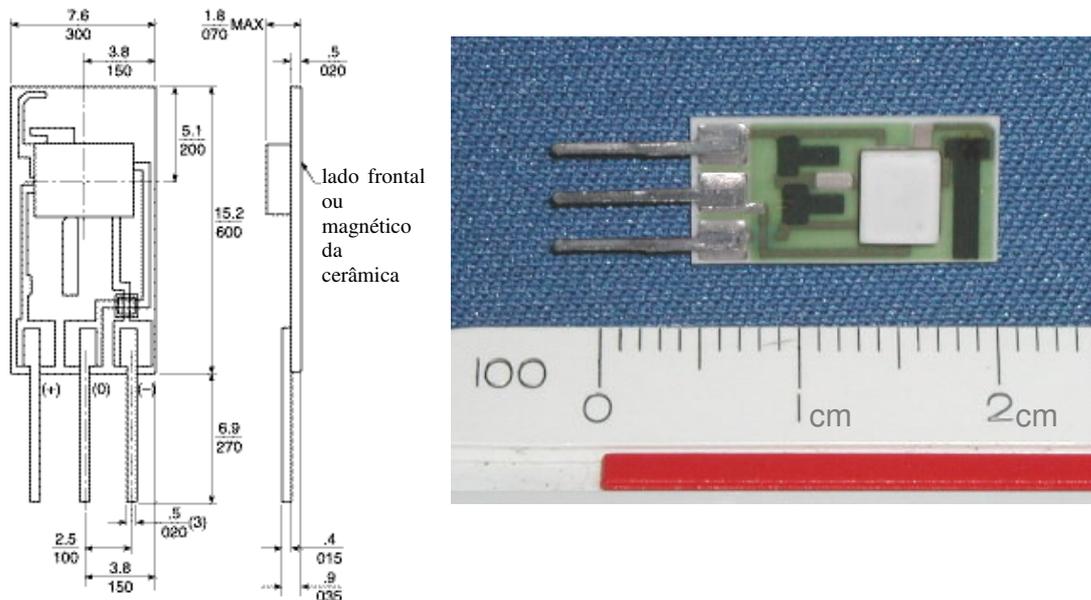


Figura 35 - Detalhe e foto do transdutor de efeito Hall utilizado.

#### 4.2.3. Avaliação de Protótipos para Projeto

Um FDPM desenvolvido anteriormente na Universidade de *Newcastle* por Akbar (2001), e que serviu de base para o equipamento desta pesquisa, possui um sistema de medições de deslocamentos (SMD) radiais (Figura 36) que atinge no máximo cerca de 1,08cm de deslocamento radial ( $\epsilon_c = 48,6\%$ ). Porém, dentro das premissas deste projeto, este valor pode vir a não ser compatível com as grandes deformações em RSU, o que gerou necessidade de modificação no projeto inicial para alcançar os deslocamentos pré-determinados.

As primeiras tentativas de projetar o SMD desta pesquisa estão mostradas na Figura 37, e foram baseadas no movimento paralelo de um ímã em relação ao sensor. Em teoria, este tipo de movimento relativo entre ímã e HET apresenta trechos de respostas mais lineares, como observado na Figura 38a, sendo indicado para aplicações cujos movimentos relativos são igualmente lineares (Akbar, 2001; Honeywell 2002).

Nos projetos piloto da Figura 37 um braço rotulado em uma das extremidades gira acionado por uma mola, acompanhando a expansão da membrana no contato com a mesma. Por sua vez, a rotação do primeiro braço movimentava um segundo braço que traz consigo um módulo com um ímã acoplado de com orientação paralela ao HET.

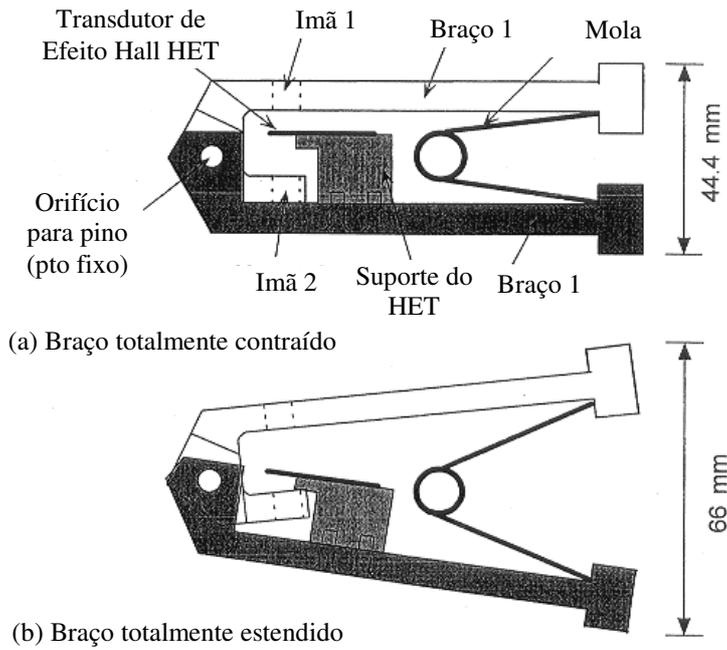


Figura 36 - Detalhe do sistema de medição existente concebido por Akbar (2001).

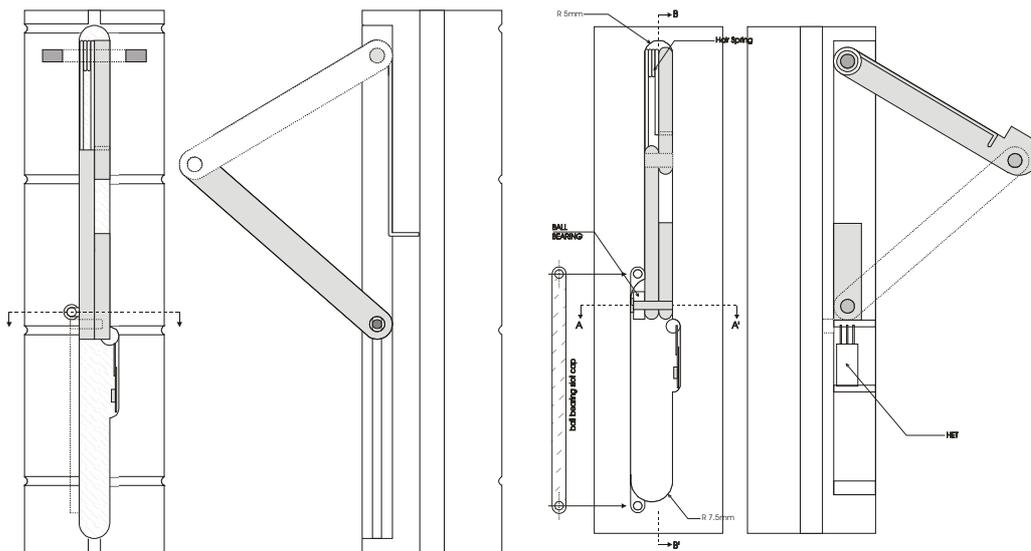


Figura 37 – Projetos piloto com movimento de ímã paralelo ao HET.

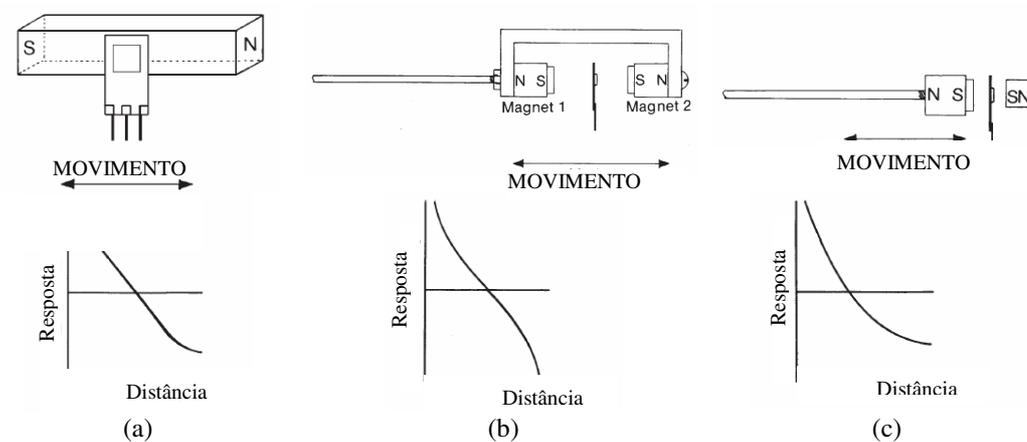


Figura 38- Respostas típicas do HET para movimentos relativos lineares.

Testes laboratoriais com a configuração da Figura 37 mostraram que a resposta com o imã empregado com este tipo de configuração não foi eficiente para o nível de deslocamentos radiais necessário, além de envolver uma montagem complexa. Resultados de calibrações com imãs e HET's se movimentado na magnitude prescrita inicialmente, não foram bons, pois a linearidade de resposta procurada restringiu-se apenas para pequenos deslocamentos relativos entre imã-HET. Sendo assim, este projeto piloto foi descartado.

Optou-se, então, pela verificação do projeto de um sistema mais simples cuja medição acontecesse a partir da rotação de apenas um braço, com dois imãs montados entre o sensor. O esquema do mesmo encontra-se apresentado na Figura 39 e possui a desvantagem do campo magnético deixar de ficar perpendicular ao elemento Hall a medida em que o braço se abre.

Para avaliar o novo projeto, foram montados alguns protótipos em PVC e realizadas diversas calibrações usando o sistema de aquisição de dados existente (Akbar, 2001), constituído por uma caixa amplificadora de sinal, um conversor de sinal analógico/digital (PICO-16) e o programa de aquisição do fabricante. O movimento real do braço em unidades métricas foi obtido pelo uso de um medidor de altura acoplado ao protótipo. O objetivo dos testes com o protótipo foi otimizar o espaçamento e o alinhamento dos imãs em relação ao sensor para obtenção de resultados mais lineares possíveis.

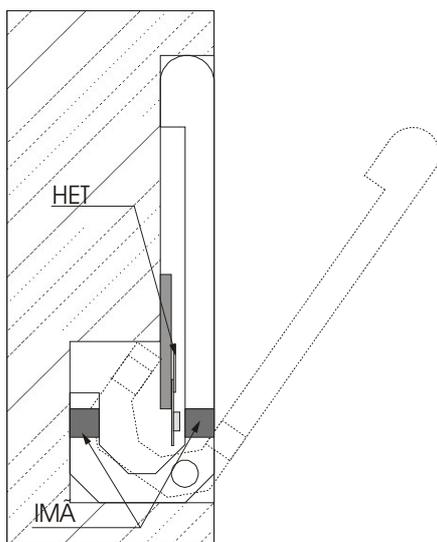


Figura 39- Esquema inicial do movimento dos imãs em relação ao HET.

Os ímãs empregados nas investigações foram do tipo botões miniatura niquelados, com de dimensões  $d = 6\text{mm}$  e  $h = 2\text{mm}$ , construídos com material magnético permanente (*Neodymium Iron Boron*) e adquiridos junto à companhia *Farnell* ([www.farnell.com](http://www.farnell.com)) sob nº de série 723-0370. Fotos dos mesmos encontram-se apresentadas na Figura 40. O norte magnético é identificado por uma pequena depressão em um dos lados.



Figura 40 – Fotos dos ímãs tipo botão usados nos protótipos.

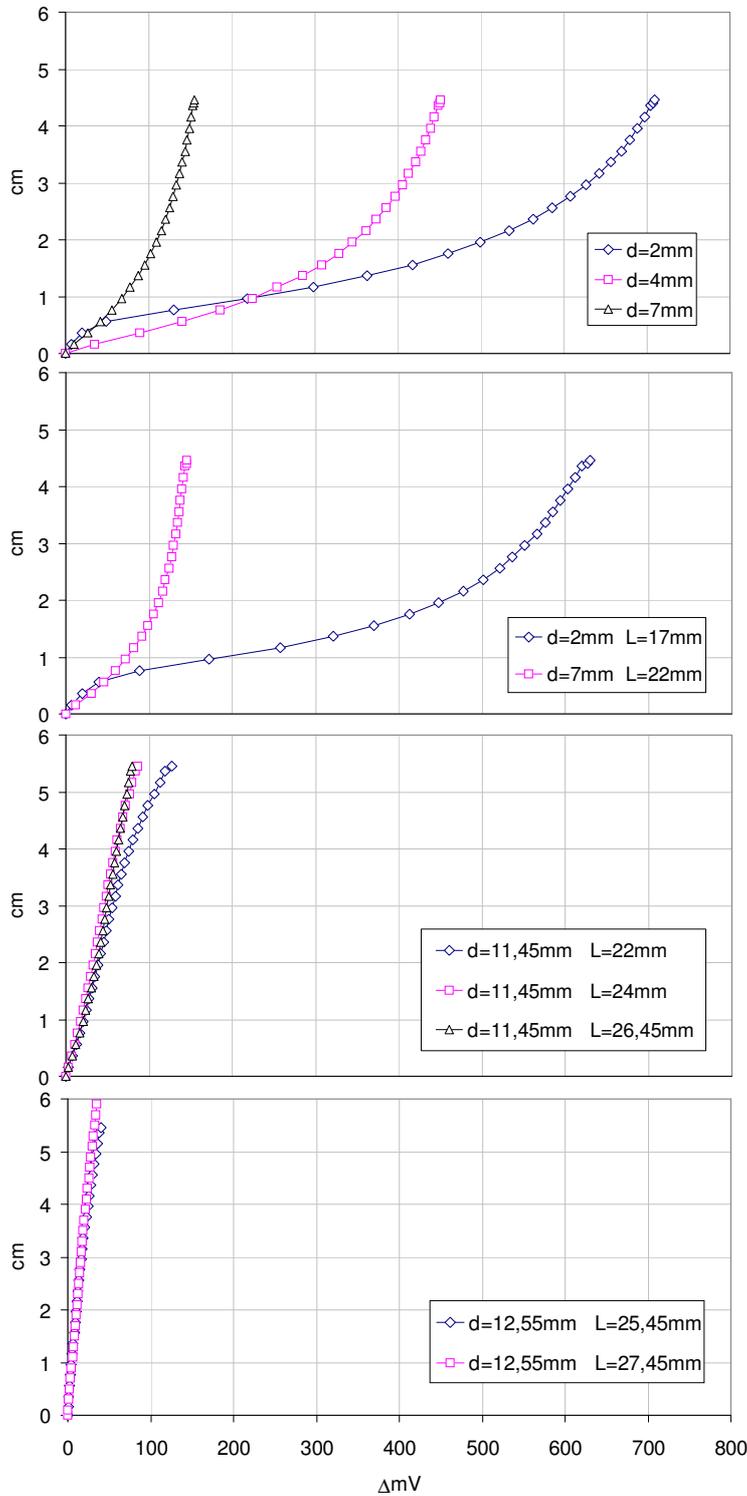
O procedimento seguido nas investigações foi realizar calibrações de abertura e fechamento dos braços para diferentes posições do HET em relação ao ímã, isto é, calibrar para várias combinações de distância e alinhamento entre os dois até obter os resultados mais lineares possíveis. Uma fonte ajustada para fornecer 5V foi usada para excitar o sistema e os dados lidos no computador. Os resultados encontram-se sumarizados na Figura 41.

As análises 1 e 2 demonstraram a não linearidade destes dois arranjos, além de evidenciar que a proximidade dos ímãs em relação ao HET, na expansão e contração, influi de forma direta e expressiva na não linearidade nos trechos iniciais e finais das curvas, respectivamente.

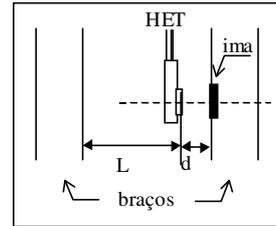
Na análise 3, o aumento do espaçamento do ímã à direita minorou o efeito da não linearidade no trecho inicial da curva. Igualmente, a mudança de alinhamento e o aumento em espaçamento do ímã à esquerda, influenciaram positivamente na diminuição do grau do polinômio de ajuste da reta.

Finalmente, através do arranjo da análise 4, obtiveram-se os melhores resultados, concluindo-se que, para a configuração projetada, o espaçamento mínimo entre ímãs deve ser de 40 mm e o ímã localizado no braço à direita deve distanciar-se em pelo menos 13 mm desde a face de medição do sensor. Estes dados valem para o ponto de rotação prescrito no projeto, bem como, para o alinhamento dos ímãs em relação à base do transdutor de efeito Hall.

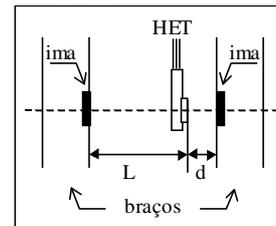
As curvas de ajuste para a Análise 4 e o melhor resultado da Análise 3 estão re-apresentadas na Figura 42 para efeito de comparação. O melhor ajuste para a calibração foi um polinômio de segundo grau, similar ao obtido por Akbar (2001) em seu sistema de medição da Figura 36.



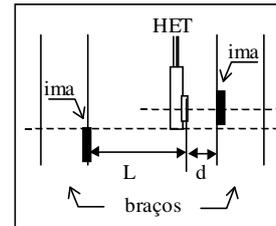
Análise 1



Análise 2



Análise 3



Análise 4

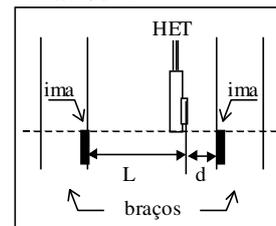


Figura 41 - Influência da distância/alinhamento dos imãs nas calibrações do protótipo.

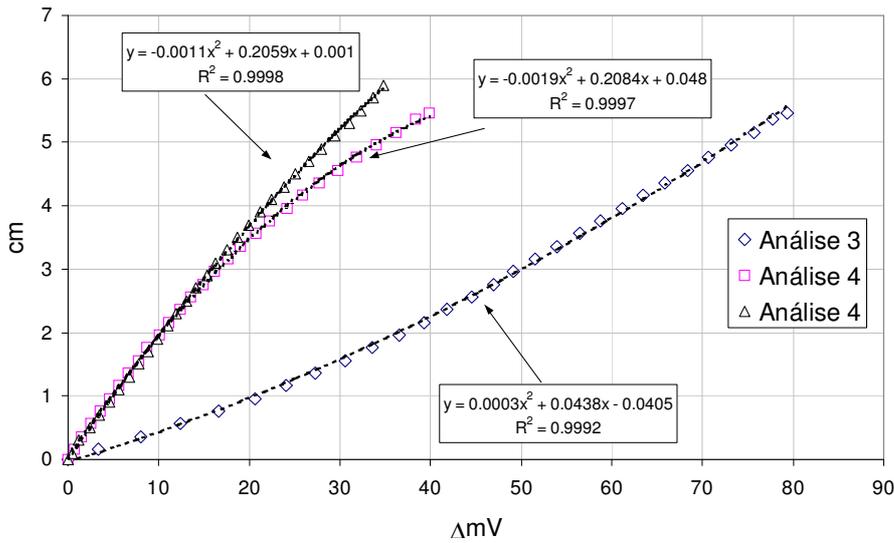


Figura 42 - Melhores curvas de calibração do segundo protótipo.

De posse das informações sobre espaçamento e alinhamento, partiu-se para a montagem de um protótipo final em PVC para melhor avaliar o sistema proposto. Uma foto deste protótipo mostrando o HET, os ímãs e o movimento rotacional do braço estão presentes na Figura 43. Com ele foram realizadas, então, novas calibrações para avaliar o comportamento dos resultados quanto a repetibilidade e histerese do sistema para ciclos de expansão e contração do braço de medição, simulando o que acontece em um ensaio pressiométrico. A curva da Figura 44 ilustra os resultados finais de calibração empregando 5V de excitação onde se nota o novo ajuste com um polinômio de segunda ordem. Os resultados foram satisfatórios, porém a sensibilidade foi baixa e da ordem de 1,7mm/mV, demandando, portanto, condicionamento eletrônico de sinal.

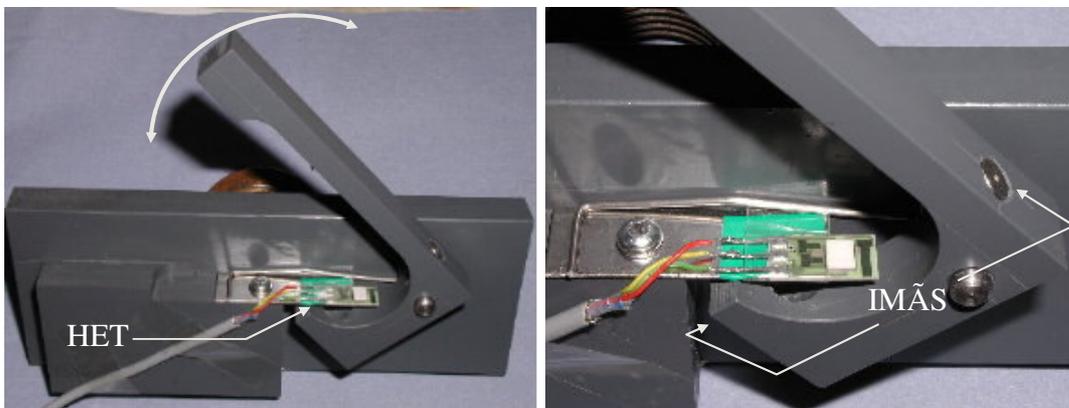


Figura 43 - Fotos do protótipo final do SMD com o HET e ímãs mostrados.

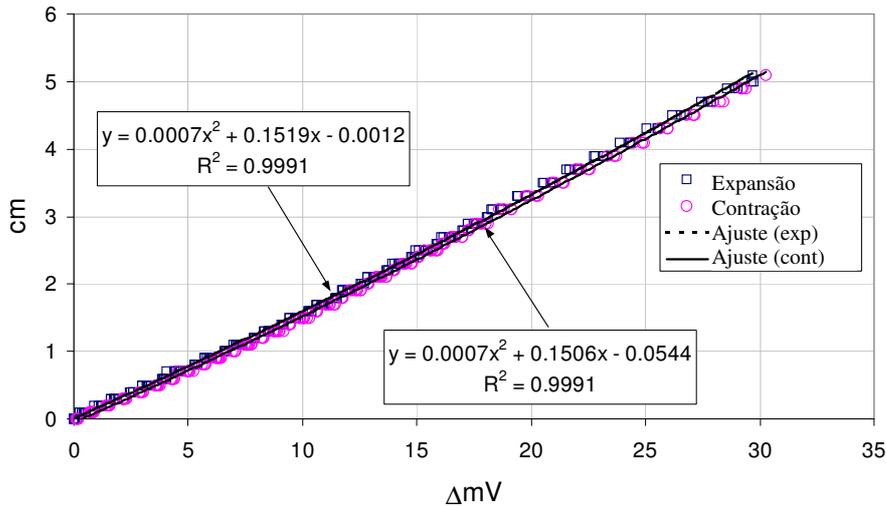


Figura 44 - Resultados de calibrações com o protótipo final em ciclos de expansão/contração.

### 4.3. Construção das Sondas Pressiométricas

Após os estudos realizados descritos no item anterior, partiu-se para a elaboração do projeto final e construção das sondas pressiométricas. Para tanto, foram torneadas no laboratório da universidade de *Newcastle* duas peças cilíndricas em aço inoxidável de alta resistência, com dimensões de 677mm de comprimento total, com aproximadamente 490mm de comprimento teste ( $L$ ) e 46mm de diâmetro externo. O diâmetro final após a colocação das membranas é de cerca de 53,5mm ( $D$ ), o que produz uma relação  $L/D = 9.1$ , similar à proposição de Withers *et al.* (1986) para cone pressiômetros.

A Sonda I (SP1), mostrada na Figura 45a, possui quatro braços móveis, que constituem o sistema de medição de deslocamentos descrito anteriormente, distribuídos ao longo do comprimento da sonda e que realizam leituras em quatro diferentes direções ortogonais entre si e em diferentes alturas na sonda.

A Sonda II (SP2), apresentada na Figura 45b, é similar à primeira, porém possui apenas três braços móveis espaçados em  $120^\circ$ , que realizam leituras em três diferentes direções, similar à configuração usada por Withers *et al.* (1986).

Considerando que a sonda SP2 possui uma cavidade do SMD a menos do que SP1 e, portanto, mais aço no seu corpo central, ela pode ser mais indicada para solos mais rígidos.

O projeto completo das sondas e de todas as partes constituintes encontram-se no Anexo I deste documento.

Note que a escolha do posicionamento dos braços móveis permite a retirada facilitada da sonda de dentro do furo caso haja ruptura da membrana e o braço fique exposto.

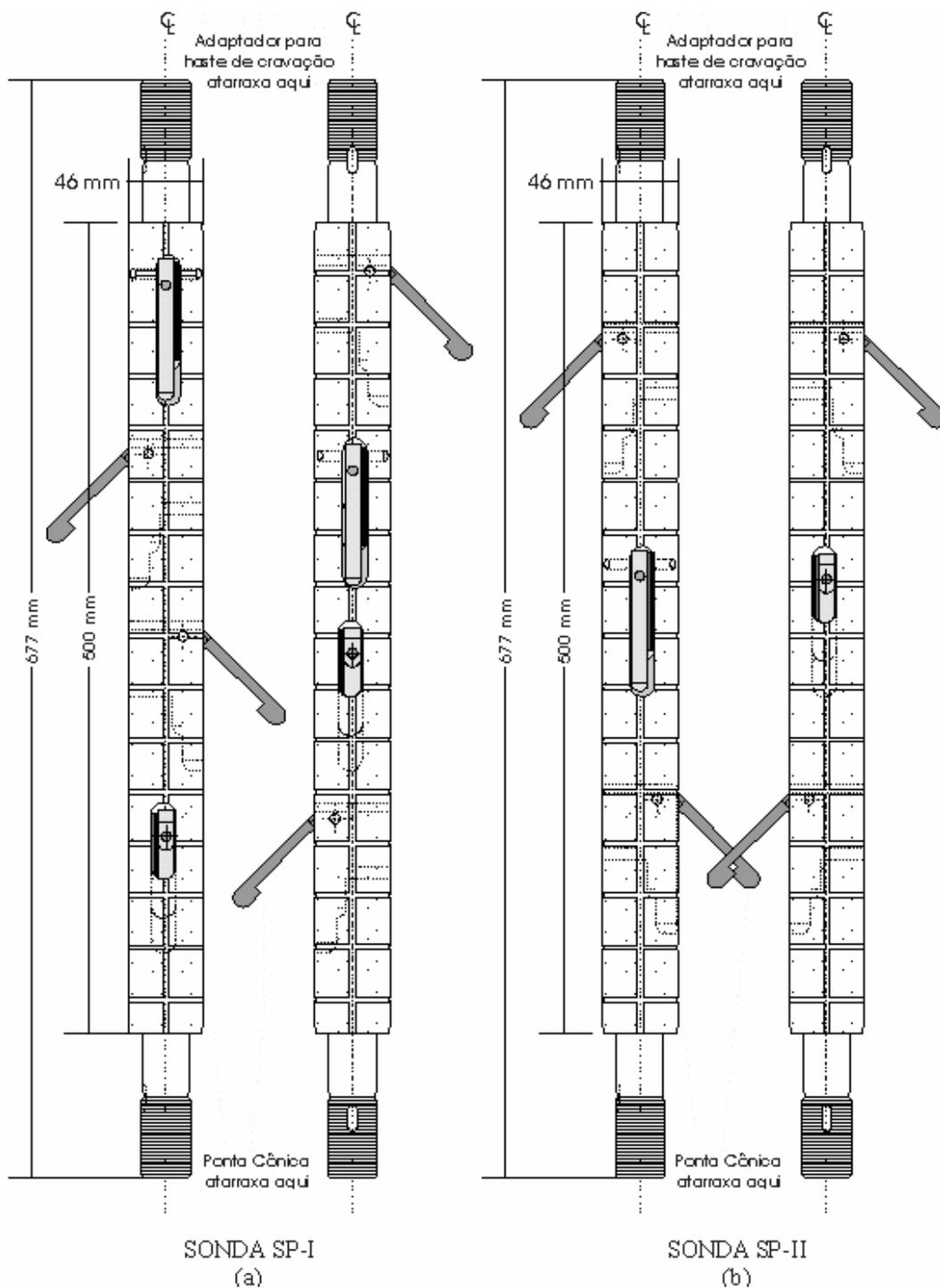


Figura 45 - Desenhos esquemáticos do corpo central das sondas SP-I e SP-II.

Ambas as sondas foram perfuradas longitudinalmente, produzindo um furo de 8mm de diâmetro, que dá acesso à fiação para excitação dos transdutores e sensores e transporte do sinal até a superfície, além de permitir passagem do gás pressurizado (nitrogênio) para expansão da membrana. A Figuras 46 mostra algumas fotos desta etapa.

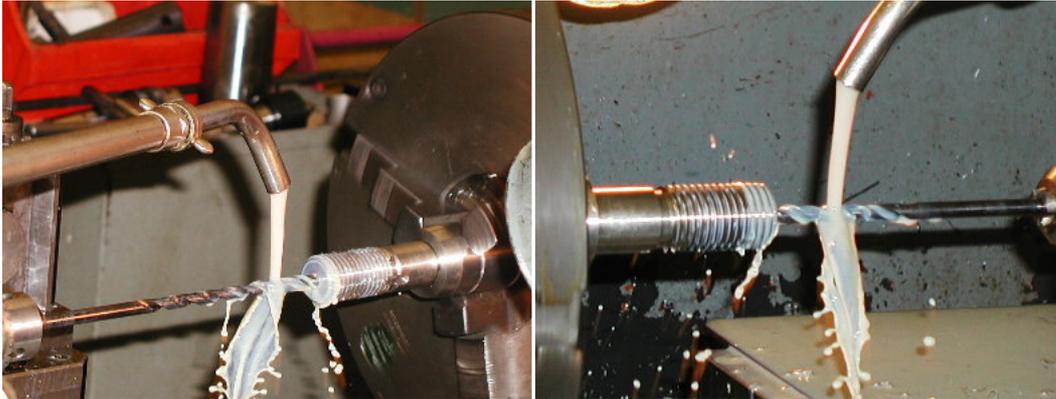


Figura 46 - Perfuração de furo longitudinal para dar acesso à fiação e gás pressurizado.

A peças possuem, ainda, roscas em suas extremidades (Figura 47) para conexão do sistema de fixação da membrana, bem como, para receber a ponta cônica e o adaptador das hastes de cravação. Além disto, a face inicial interna do furo longitudinal possui rosca para receber a mangueira hidráulica.



Figura 47 - Detalhe da rosca M30x1,5 em cada extremidade das sondas.

Três ou quatro cavidades com geometrias idênticas, possuindo largura de 15 mm e alturas máxima e mínima de 92.5mm e 47mm, transpassam irregularmente os corpos cilíndricos das sondas para guardar os braços giratórios do sistema de medição de deslocamentos. Fotos do processo de torneamento estão apresentadas na Figura 48.

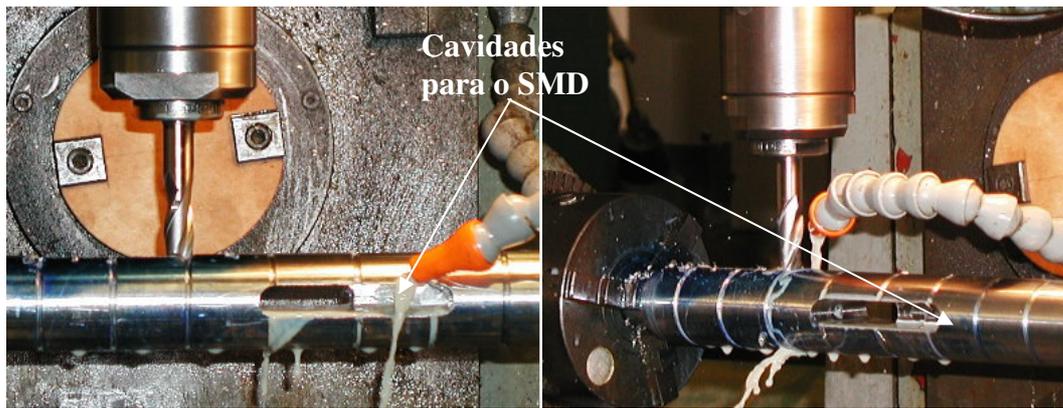


Figura 48 - Torneamento das cavidades para o SMD.

As sondas possuem, ainda, sulcos radiais na face exterior, interconectados por sulcos longitudinais, que têm a finalidade específica de distribuir igualmente e instantaneamente o gás pressurizado na interface sonda-membrana à medida que este tenta descolar a membrana do corpo da sonda.

#### **4.4. Característica das Demais Partes Constituintes**

##### **4.4.1. Membrana Semiflexível**

A tipologia de membrana semiflexível mais indicada ao contexto dos RSU ainda é um ponto discutível dentro desta pesquisa, demandando mais investigações a respeito e até mesmo construção de dispositivos de proteção como as lanternas chinesas.

Akbar (2001) empregou com sucesso membranas feitas de borracha nitrílica reforçadas com fibras longitudinais de nylon. Portanto, como o trabalho de Aziz (2001) serviu como base para esta Tese, optou-se por utilizar uma configuração similar, modificando a espessura da parede e aumentando o reforço.

As membranas utilizadas são tubos fabricados em borracha nitrílica reforçados longitudinalmente com fibras de nylon e uma proteção externa de tecido tipo “canvas”. O diâmetro interno é de 42mm e o externo de aproximadamente 50mm, o que produz uma espessura da parede de 4mm em condição não deformada. Os tubos foram adquiridos junto a empresa Inglesa *Redweld Cerambomd* ([www.rediweld.co.uk](http://www.rediweld.co.uk)) em comprimentos de 3m e cortados

em tamanhos específicos para os ensaios, isto é, cerca de 510mm. O diâmetro externo das membranas após a colocação nas sondas é de 53,5mm, causando pouca fadiga no material e mantendo-se justa o suficiente para cravação do PC-RSU.

Cabe ressaltar que as membranas constituídas por duas camadas longitudinais ficaram muito rígidas, não sendo possível expandi-las devido às restrições impostas pela fixação nas extremidades. Ao expandi-las ao ar, como um balão, notou-se que elas expandiam radialmente, porém com uma acentuada diminuição em comprimento. Como no pressiômetro elas são fixas na extremidade, a expansão radial ficou restrita. Por conta disso, elas foram descartadas para uso nesta Tese.

A Figura 49 apresenta uma foto da extremidade da membrana.



Figura 49 - Detalhes da membrana semi flexível de borracha.

#### **4.4.2. Sistema de Fixação da Membrana**

Após a colocação da membrana, item este que merece atenção especial e que será abordado posteriormente, a fixação da membrana ocorre em cada extremidade da sonda por meio de um conjunto de peças em latão colocadas. Na ponteira da sonda o conjunto é constituído pelas partes 1, 2 e 3 da Figura 50. A peça 1 é um anel com ranhuras na face externa, cujo diâmetro externo é aproximadamente igual ao diâmetro interno do tubo de borracha e é fica alojado entre a sonda e a membrana semiflexível. A peça 2 é um copo metálico vazado, com diferentes inclinações internas, que serve para sobrepor a borda livre da membrana, comprimindo-a contra a peça 1 e a face inclinada da sonda.

Finalmente, a peça 3 é um anel com rosca que promove o aperto no sistema empurrando a peça 2. Em seguida, a ponteira cônica funciona como contra porca.

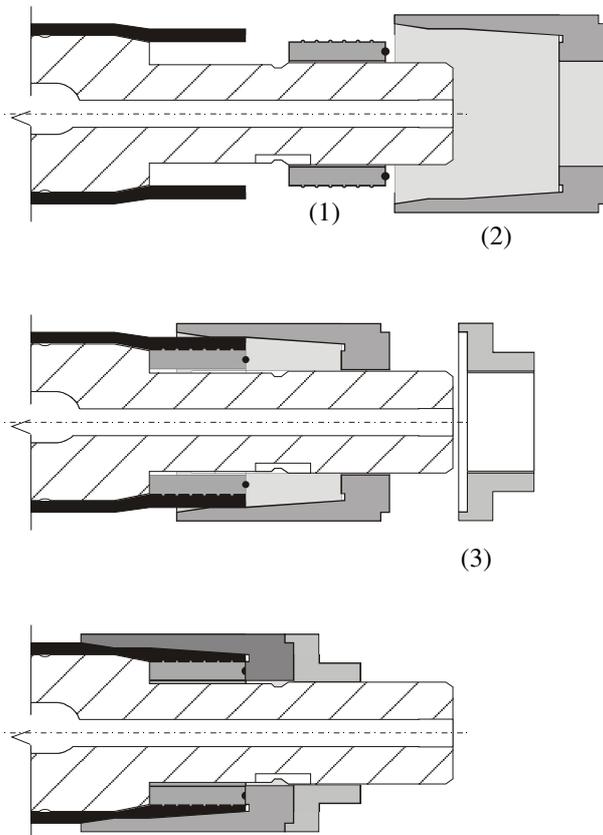


Figura 50 - Detalhe do sistema de fixação da membrana expansível

Inicialmente as sondas tinham as suas respectivas mangueiras hidráulicas e cabos elétricos conectados permanentemente na cabeça da sonda. Nesta época o sistema de fixação descrito anteriormente era usado em ambas as extremidades. Porém, sobrava pouquíssima rosca na sonda para conectar o adaptador das hastes de cravação, configurando um ponto de fraqueza. Além disto, se houver necessidade de troca de sonda durante um ensaio o tempo gasto seria grande para trocar o conjunto todo. Então, modificou-se o sistema de fixação da membrana no que se refere peça 3 de aperto conforme o esquema apresentado na Figura 51. No caso, as peças 1 e 2 são usadas na mesma forma, porém emprega-se a peça 4, que é uma parte cilíndrica oca, com rosca em ambas as extremidades e que dá aperto ao sistema e recebe a mangueira hidráulica. Posteriormente, ela recebe a peça 5 que é o adaptador com rosca cônica para as hastes de cravação.

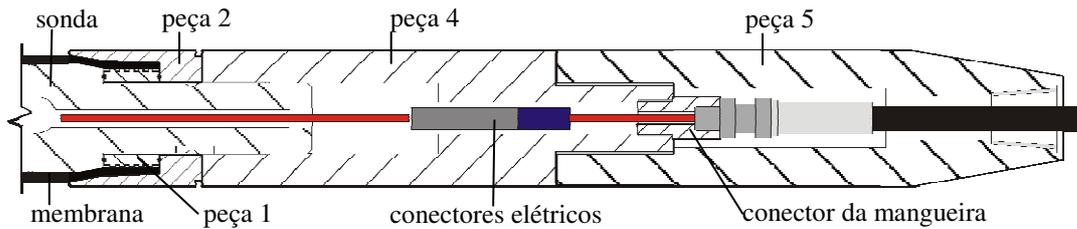


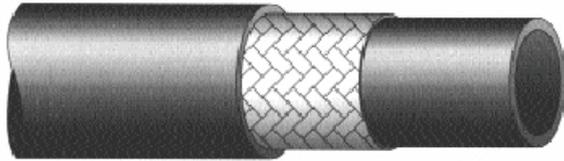
Figura 51 – Esquema da fixação da membrana no topo das sondas

#### 4.4.3. Ponteira Cônica

Uma ponteira cônica de aço inoxidável, com 45° de inclinação (similar ao pressiômetro desenvolvido por Akbar, 2001), diâmetro externo de 58mm e área da ponta de aproximadamente 26,4cm<sup>2</sup>, é atarraxada à extremidade final da sonda, ficando em contato com a rosca de fixação da membrana. O propósito desta ponteira é de auxiliar na cravação do pressiômetro e servir como espaçador diminuindo o atrito na membrana durante a cravação e preservando-a. O diâmetro da ponteira (58mm) é cerca de 8% maior do que o diâmetro do sonda mondada com a membrana (53,5mm). Detalhes da ponteira estão no Apêndice I.

#### 4.4.4. Mangueira e Conexões Hidráulicas de Pressão

As sondas são conectadas à superfície por intermédio de uma mangueira hidráulica de alta pressão adquirida junto à empresa Inglesa *Europower Hydraulic Limited* ([www.europower-hyds.com](http://www.europower-hyds.com)). Esta mangueira é do tipo *Euroflow 702* que é compatível com óleos hidráulicos, graxa, e óleos minerais. Ela também é indicada para uso com gases industriais como hélio, argônio, nitrogênio, gás carbônico e ar. A construção do modelo 702-4 consiste em um tubo elástico de poliéster não plastificado, reforçado com um encamisamento de fios de aço impregnados com bronze e revestido por uma camada externa de poliuretano preto. A Figura 52 descreve esta construção e a Tabela 13 apresenta as especificações do modelo escolhido.

Figura 52 - Construção da mangueira de alta pressão *Euroflow 702*.Tabela 13 - Folha característica das mangueiras *Euroflow 702*.

TIPO													FERROLHO PARTE Nº
	DIÂMETRO NOMINAL INTERNO		DIÂMETRO NOMINAL EXTERNO		RAIO MÍNIMO DE CURVATURA		PRESSÃO DINÂMICA TRABALHO		PRESSÃO MÍNIMA DE RUPTURA		PESO		
	IN	M M	IN	M M	IN	M M	PSI	BAR	PSI	BAR	LB/FT	KG/M	
702-03	3/16	4.8	0.37	9.4	1.2	30	5250	362	21000	1448	0.08	0.12	X03HR1
702-04	1/4	6.7	0.46	11.7	1.6	40	4500	310	18000	1245	0.11	0.16	X04HR1
702-05	5/16	8.3	0.53	13.4	2.0	50	3500	240	14000	963	0.13	0.19	X05HR1
702-06	3/8	9.9	0.60	15.1	2.4	60	3250	224	13000	896	0.15	0.23	X06HR1
702-08	1/2	13.1	0.72	18.3	3.0	75	2750	190	11000	758	0.20	0.30	X08HR1
702-10	5/8	16.3	0.85	21.5	4.3	110	1875	130	7500	517	0.24	0.35	X10HR1
702-12	3/4	19.6	1.00	25.5	6.7	170	1750	120	7000	483	0.29	0.43	X12HR1
702-16	1	25.9	1.25	31.8	9.1	230	1500	103	6000	414	0.38	0.56	X16HR1

A mangueira carrega no seu interior os cabos elétricos que conectam a sonda à caixa eletrônica na superfície. Em cada extremidade existem conectores de engate rápido com 7 pinos, que são conectados a sonda e ao separador elétrico gasoso na superfície. Para as atividades de campo existem dois jogos de mangueira com 22m cada. As fotos a seguir mostram alguns detalhes do conjunto.

#### 4.4.5. Separador Elétrico-Gasoso (SEG)

O separador elétrico gasoso (Figura 54) foi adaptado do projeto de Akbar (2001) e possui as seguintes finalidades:

- Propiciar continuidade elétrica entre a sonda e a caixa eletrônica de controle;
- Possibilitar a passagem e aplicação do nitrogênio pressurizado;
- Permitir conexão e desconexão rápida com a mangueira de alta pressão e com o painel de controle de pressões;
- Guardar o transdutor de pressão.



Figura 53 – Detalhes da mangueira de pressão e conectores.

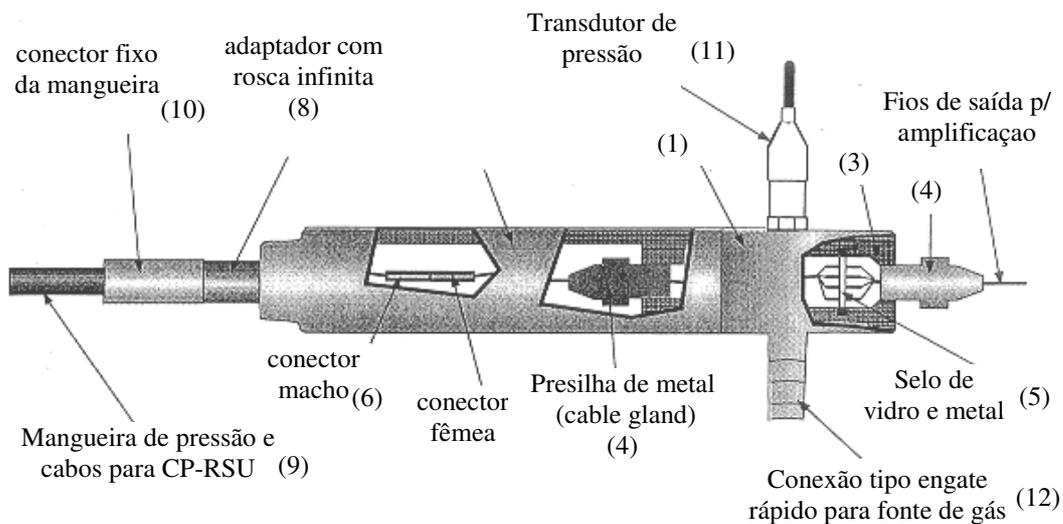


Figura 54 - Detalhe do separador elétrico-gasoso.

O SEG é formado pela montagem de uma série de componentes menores. As peças 1 e 2 são peças cilíndricas ocas de aço inoxidável atarraxáveis entre si. Ao final, na parte 2 à direita, está a peça de vedação de vidro e metal (parte 5), de pequena espessura, com 8 pinos transpassando-a para soldagem dos fios de excitação e sinais dos HET's, adquirida junto à companhia *Wesley Coe*, UK, (<http://www.wesley-coe.com>), parte número 1900566, e que permite apenas a

passagem do sinal elétrico, impedindo a passagem do nitrogênio. Segundo o fabricante, tais peças devem suportar pressões máximas de 50bar. O aperto deste selo se dá através de uma peça cilíndrica também em aço inoxidável (parte 3), um macho com rosca e com furo longitudinal, que é atarraxado pressionando o selo contra um o anel de vedação de borracha no fundo da parte 2. Adicionalmente, na parte 2 são conectados um registro com uma conexão tipo engate rápido (*Swagelok* parte nº SS-QF4-S-4PM) para uso na fonte de gás pressurizado; e um transdutor de pressão para medição das pressões aplicadas. Em ambos os lados da parte 2 são usadas presilhas de metal atarraxáveis (*cable gland, RS Components*, parte nº 390-088) para manter o cabo elétrico fixo e prevenir ruptura dos fios. No interior, o conector fêmea de oito pinos (*RS Components*, parte nº 248-3980) é ligado ao selo de vidro e metal por meio de um cabo de oito vias que é devidamente soldado. As presilhas, quando atarraxadas, mantêm este cabo seguro prevenindo contra torções.

Um adaptador com rosca infinita (peça 8) é empregado para conectar a mangueira de pressão à parte 2. A fiação elétrica que passa por dentro da mangueira, e que passa também por este adaptador, é devidamente soldada ao conector macho de oito vias (*RS Components*, parte nº 248-3980). A peça 2 do SEG possui espaço interno suficiente para guardar os conectores macho e fêmea, bem como, um curto pedaço do cabo elétrico que fica solto quando da montagem final do sistema.

#### **4.4.6. Caixa de Controle de Pressões**

Durante o ensaio pressiométrico, a caixa de controle (Figura 55) fica na superfície e serve para aplicar e controlar as pressões de gás no interior do pressiômetro promovendo a expansão da membrana. Este painel de controle é simples e foi montado em uma caixa de material plástico com alça para facilitar o transporte. As suas conexões e tubulações internas são de aço inoxidável como pode ser notado na Figura 55. Além disto, a caixa está equipada com duas válvulas que controlam a entrada do nitrogênio, uma (parte 1) para pressões baixas de até 10bar e outra (parte 2) para pressões altas de até 50bar. O painel possui 4 registros para proteção das válvulas e direcionamento do fluxo (partes 3 a

6). Por sua vez, as partes 7 e 8 são conectores de engate rápido que permitem a entrada de gás proveniente do cilindro e saída para o separador gasoso elétrico, respectivamente. Quando necessário, um manômetro pode ser facilmente conectado ao SEG para aferir diretamente as pressões aplicadas.

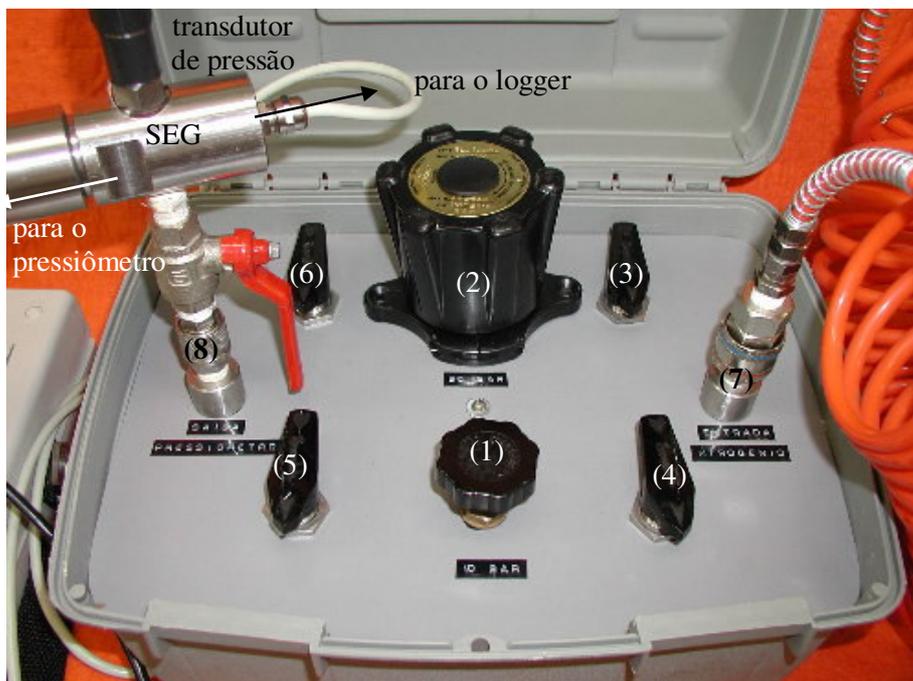


Figura 55 - Detalhe frontal do painel da caixa de controle.

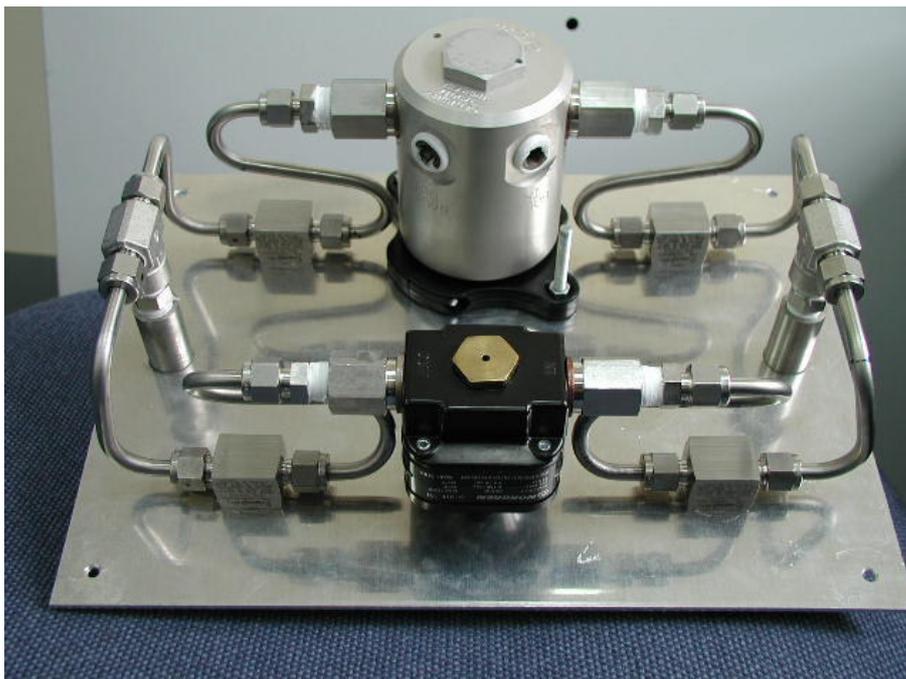


Figura 56 - Detalhe das conexões e tubulações internas da caixa de controle.

#### 4.4.7. Condicionamento Eletrônico e Aquisição de Dados

Uma caixa eletrônica (CE) foi montada para guardar o circuito integrado de condicionamento eletrônico dos transdutores e sensores da sonda, uma fonte de alimentação e o conversor analógico digital do conjunto. A CE é o elo de interface entre a sonda e o computador portátil onde os dados são armazenados. A Figura 57 apresenta fotos da caixa fechada e aberta mostrando que o painel frontal possui uma chave para ligar e desligar o circuito, um conector (fêmea) DIN de 4 pinos para ligar o transdutor de pressão do SEG, um conector (fêmea) DIN de 7 pinos para conectar a fiação de alimentação e sinal do pressiômetro e uma saída serial do tipo RS-232, para conexão com um computador portátil. No painel traseiro (não mostrado) há duas entradas para pinos tipo “banana” para recarregar a bateria interna.

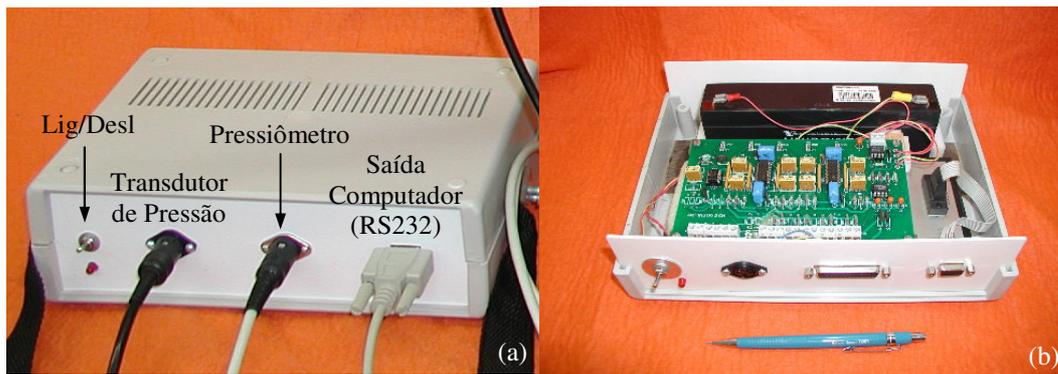


Figura 57 – Fotos da caixa eletrônica de amplificação e aquisição.

O circuito integrado (CI) que é o coração da CE é um circuito de amplificação de 5 canais, onde quatro deles são para os HET e um é para o transdutor de pressão. O CI é alimentado por uma bateria recarregável selada de 12V e 2,3AH (Figura 58) que estabiliza e regula a voltagem de entrada para 9V, fornecendo excitação para todos os transdutores. O CI, então, divide este valor pela metade (4,5V) para fornecer o valor de voltagem de referência ( $V_{ref}$ ) usado pelo conversor (PICO). Além disto, o sinal de saída dos transdutores é amplificado no CI por meio de amplificadores operacionais para a faixa de aquisição do logger (+/- 2,5V para 16bits) e são redirecionados para a entrada do conversor. Por sua vez, o sinal de saída do sensor de temperatura não é amplificado e vai direto para o conversor. O CI possui alguns potenciômetros

(*trimmers*) que servem para ajustar do ganho de amplificação e o valor do *offset* inicial (referência). A Figura 59 apresenta uma foto do circuito integrado com as partes eletrônicas.



Figura 58 – Bateria recarregável de 12V usada como fonte de alimentação do circuito.

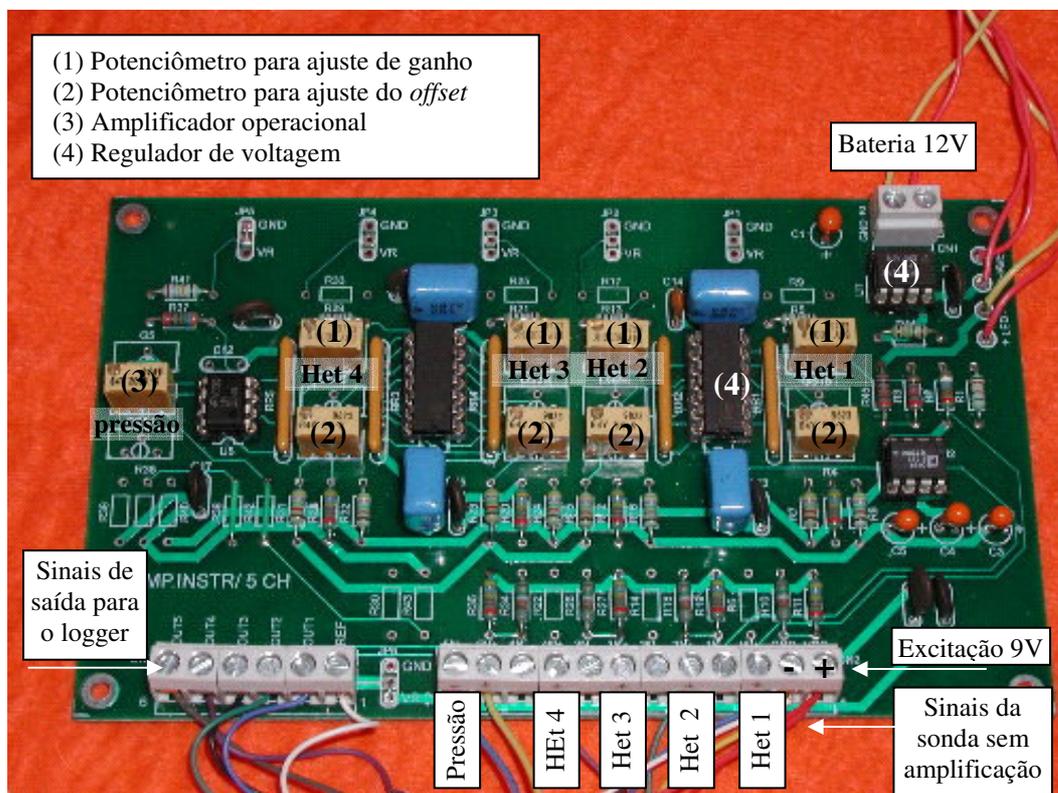


Figura 59 – Detalhes do CI de amplificação da caixa eletrônica.

O sistema de aquisição de dados usado pelo PC-RSU foi acomodado dentro da caixa eletrônica e é constituído por um conversor analógico-digital, de fabricação da empresa *Pico Technology Limited* ([www.picotech.com](http://www.picotech.com)) e adquirido junto a distribuidora *RS Components* ([www.rsww.com](http://www.rsww.com)), número de série RS 206-4258. O conversor é o modelo PICO ADC-16, com oito canais de aquisição, que

podem fazer leituras diferenciais ou não, com resolução de 16 bits e faixa de leitura de +/- 2,5V. O conversor possui conectores de entrada do tipo D25 fêmea e saída D9 serial (RS232) e fornece, ainda, dois sinais de saída fixos de referência +/- 5V. A foto ilustrativa do conversor está apresentada na Figura 60.

O programa de aquisição que acompanha o conversor (*PicoLog*) é de simples uso, tem uma plataforma bastante amigável em várias versões do Windows© e é bastante versátil na possibilidade de visualização e aquisição das informações e de programação.



Figura 60 - Conversor analógico-digital de 8 canais usado para aquisição.

#### 4.4.8. Fonte de Pressão

Como fonte de pressão empregam-se cilindros metálicos pressurizados com gás nitrogênio do tipo comum (não há necessidade de pureza), que são comercializados em vários tamanhos e por algumas empresas (p.ex. White Martins). Os menores ( $h = 85\text{cm}$  e  $D = 20\text{cm}$ ) facilitam o transporte, pois são mais leves (6kg) e fornecem pressões iniciais da ordem de 2000kPa, porém o volume de gás é menor e, portanto a autonomia é reduzida. A escolha do tamanho depende das condições de investigação, porém indica-se o emprego de pelo menos um cilindro médio e um pequeno de reserva.

Os cilindros normalmente possuem duas válvulas com dois manômetros que regulam a pressão alta de saída do cilindro disponível e a pressão de saída de trabalho. Nos ensaios, a fonte de pressão é conectada na parte 7 da Figura 55 (caixa de controle de pressões) através de uma mangueira hidráulica sanfonada com conectores de engate rápido nas suas extremidades.

A Figura 61 apresenta uma foto do cilindro conectado à caixa de controle de pressões.



Figura 61 – Fonte de pressão conectada na caixa de controle de pressões

#### 4.4.9. Dispositivos de Instrumentação da Sonda

##### 4.4.9.1. Transdutor de Pressão

Os acréscimos de pressões aplicados nas sondas são medidos por meio de um transdutor de pressão conectado ao SEG e ligado na caixa eletrônica, onde o sinal é condicionado para posterior aquisição no *logger*. Dois transdutores de pressão foram calibrados para uso com o equipamento: um do fabricante *Druk* para pressões de trabalho de até 1500kPa (*RS Components*, parte nº 646-662) e outro do fabricante *Schaevitz* para pressões de trabalho de 3500kPa.

##### 4.4.9.2. Transdutor de Deslocamento

Os deslocamentos radiais da membrana flexível são medidos por meio do SMD descrito anteriormente que faz uso de um transdutor de efeito Hall. No presente trabalho, o circuito de efeito Hall empregado foi o *LOHET II* da fabricante *Honeywell Microswitch* (*RS Components*, parte nº RS 650-548).

A sonda pressiométrica SP-I possui quatro HET's ao longo do seu corpo, enquanto que a sonda SP-II possui somente três. Detalhes do SMD sistema estão

contidos no Apêndice deste documento, enquanto que resultados da avaliação da performance do SMD projetado estão apresentados no item sobre calibrações.

#### **4.4.9.3. Sensor de Temperatura**

O sensor de temperatura usado nas sondas pressiométricas é o LM35CAH da companhia *National Semiconductor*, adquirido junto à empresa *Farnell* (parte nº 55555) e tem a finalidade específica de verificar a variação de temperatura interna na sonda que atua sobre os sensores de deslocamento (HET), não a do meio ambiente externo, para fins de correções das calibrações. A série LM35 refere-se aos sensores de temperatura de precisão com circuito integrado que apresentam saída de voltagem linear e proporcional a temperatura em graus Celsius. Este sensor possui as seguintes características:

- calibrado diretamente em graus Celsius;
- linear + 10mV/°C;
- faixa de trabalho de -55°C a + 150°C;
- baixo custo;
- operação com 4 a 30V;
- consumo menor que 60µA;
- pequeno aquecimento, 0.08°C ao ar parado;
- típica não-linearidade +/-1/4 °C;
- baixa impedância, 0,1Ω para carga de 1mA.

O sensor possui dimensões reduzidas (aprox. 4mm de diâmetro) e por isso não ocupa grande espaço na sonda pressiométrica. A Figura 62a apresenta o esquema dos pinos na face posterior do sensor, enquanto que a Figura 62b apresenta uma aplicação típica do sensor. Neste caso a temperatura é obtida diretamente segundo a orientação da folha de caracterização do fabricante, apresentando uma variação de 10mV/°C.

O sensor foi colado em ambas as sondas SP1 e SP2 na cavidade do último HET, mais próximo a ponteira cônica como pode ser observado na Figura 63. O sensor é alimentado por 9V proveniente da caixa eletrônica e não recebe

condicionamento de sinal de saída, que vai direto até o conversor, onde o *ground* de referência é outro (4,5V). O esquema desta configuração é apresentado na Figura 64. De fato, esta configuração induz a perda de voltagem devido ao comprimento do cabo até a caixa eletrônica ( $\Delta V_{cabo}$ ) e devido ao consumo por cada HET na sonda. Além disto, o valor de voltagem de saída do sensor ( $V_s$ ) é lido em relação ao valor de referência ( $V_{ref}$ ) que é diferente daquele do circuito. Sendo assim, foi necessário realizar calibrações para aferir a equação de correlação.

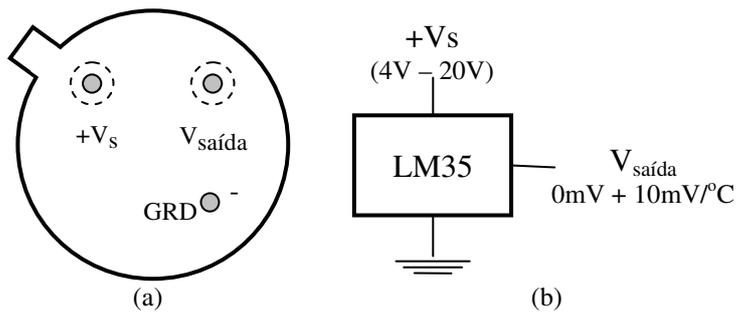


Figura 62 – Detalhes sobre a aplicação do sensor de temperatura LM35.

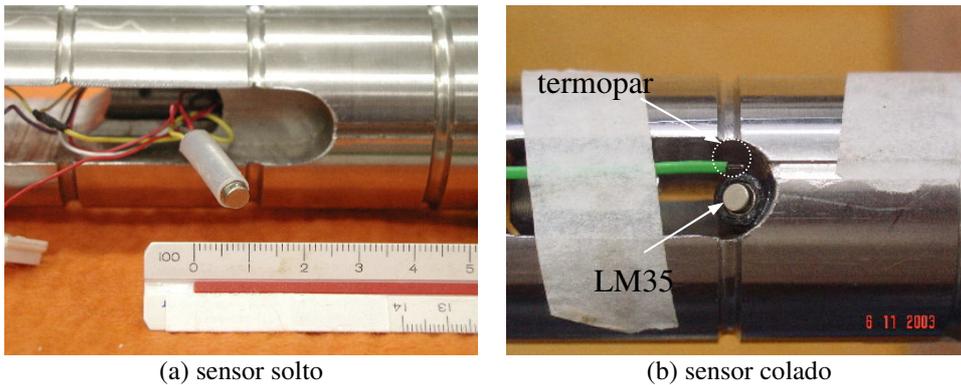


Figura 63 – Fotos do sensor de temperatura e sua localização na sonda.

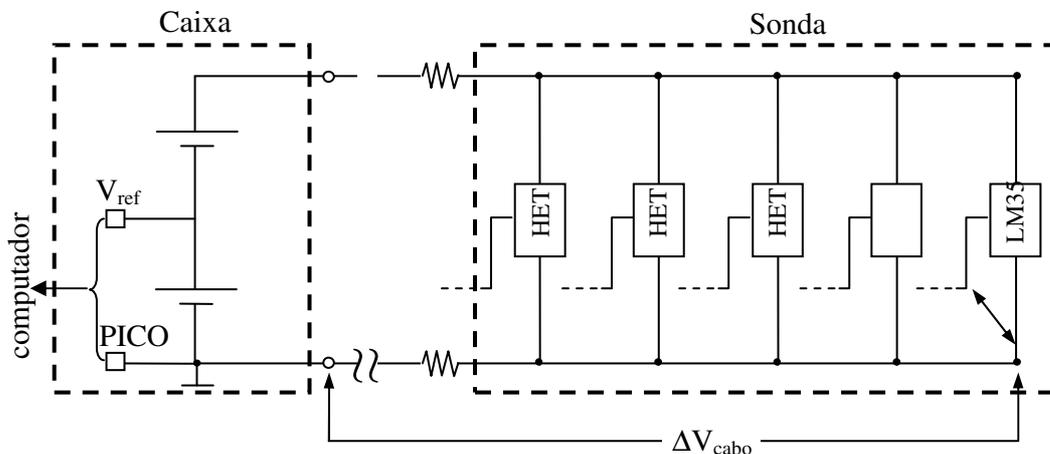


Figura 64 – Esquema da conexão elétrica do sensor de temperatura.

#### 4.4.10. Cabos Elétricos e Convenção de Cores

Os fios elétricos que excitam os HET's e trazem os sinal à superfície estão em um cabo que passa por dentro da mangueira hidráulica de pressão até as sondas. Na sonda SP-I foi usado um cabo com 9 vias enquanto que na sonda SP-II foi usado um cabo com 6 vias, ambos com blindagem e camada externa de borracha como observado na Figura 65. As espessuras dos cabos são de 4.4mm e 3.8mm respectivamente. Nas extremidades dos mesmos, no trecho que passa pela conexão final da mangueira de pressão, a borracha de cobertura foi retirada para evitar o bloqueio da passagem de nitrogênio.

A numeração dada aos transdutores de deslocamento é crescente a partir do topo da sonda até a ponteira cônica, isto é, HET 1 é o mais próximo do adaptador da haste, enquanto que HET 4 está mais próximo da ponteira cônica.

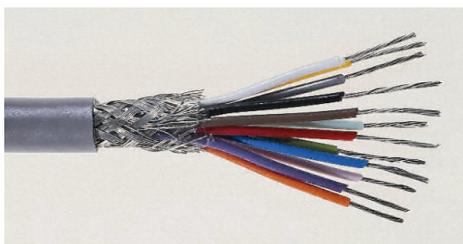


Figura 65 - Exemplo ilustrativo dos cabos elétricos utilizados.

A convenção de cores dos fios adotada para a montagem está apresentada na Tabela 14, enquanto que a convenção de pinos e canais no conversor está na Tabela 15.

Tabela 14 - Convenção de cores dos fios adotada.

	SP-I	SP-II
Fonte positiva	Vermelho	Vermelho
Fonte negativa	Amarelo	Amarelo
Sinal HET1	Azul	Azul
Sinal HET2	Verde	Verde
Sinal HET3	Preto	Preto
Sinal HET4	Roxo	-
Sinal do Sensor de Temp	Branco	Branco

Tabela 15 - Convenção de pinos usada na conexão do ADC-16 com a caixa eletrônica.

Pino/Canal	Conexão
1	HET 1
2	Temperatura
3	HET 2
4	(livre)
5	HET 3
6	(livre)
7	HET 4
8	Transdutor de Pressão
11	2.5V ref.
12	+5V saída
13	-5V saída
14 – 25	Ground do computador

#### 4.5. Procedimentos para Colocação da Membrana

A colocação da membrana nas sondas ainda é um ponto que necessita melhoras na sua metodologia executiva, pois é bastante trabalhosa e requer idealmente duas pessoas. Entretanto, após a troca de cerca de 15 membranas chegou-se a uma metodologia que diminuiu consideravelmente o tempo e a energia gastos no processo. Neste caso, dois acessórios foram fundamentais. Um pedaço de mangueira de PVC de 2” (semiflexível) cortado no comprimento teste da sonda e com uma das extremidades com diâmetro aumentado. O procedimento para preparar a peça foi aquecer uma das pontas com um soprador térmico para amolecê-la e, em seguida, empurrar contra uma das pontas cônicas (pelo cone) para que a mangueira se moldasse ao diâmetro maior do cone (58mm). Ao esfriar a mangueira teria cerca de 5cm de uma das extremidades com diâmetro superior a 2”. A outra peça era bastão cilíndrico com cerca de 40cm de comprimento e 4cm de diâmetro, oco até metade de seu comprimento e com rosca para atarraxar em uma das extremidades da sonda, para fins de vedação.

O procedimento empregado na colocação das membranas está discriminado a seguir.

1. Limpar as membranas internamente com uma esponja com um pouco de vaselina em pasta para retirar os detritos da fabricação;

2. Com a membrana limpa, revestir internamente com vaselina em pasta usando uma esponja e uma vareta para alcançar a porção central. Não utilizar estopa nesta fase;
3. Fixar na membrana, com auxílio de uma braçadeira de metal, a peça cilíndrica vazada (ver desenhos no Apêndice), com conexão de engate rápido e registro, conectando-a com a mangueira de pressão da linha do compressor;
4. Com a sonda desconectada da mangueira hidráulica atarraxar o bastão cilíndrico na extremidade superior da mesma, com cuidado para não esmagar, torcer ou cortar os fios que devem ficar na parte oca do cilindro.
5. Com a sonda apoiada horizontalmente nas duas bancadas de madeira limpar a superfície com um óleo tipo WD-40, podendo usar estopa;
6. Secar com papel e aplicar com esponja uma camada de vaselina em pasta em toda a superfície externa;
7. Limpar internamente a mangueira (tubo) semiflexível, passando vaselina em seguida;
8. Começando pela extremidade que teve seu diâmetro aumentado, vestir a mangueira (tubo) na sonda, no sentido do topo para a base. Os braços serão fechados com este procedimento.; A mangueira de PVC deve ficar ligeiramente frouxa;
9. Colocar a sonda verticalmente de cabeça para baixo apoiada pelo bastão;
10. Vestir a membrana na sonda sem o compressor somente no trecho inicial;
11. Mover de forma ascendente a mangueira de PVC até a membrana sobrepondo-a com a extremidade de diâmetro maior;
12. Com uma das mãos no topo da membrana e a outra agarrando o conjunto sobre si, abrir o registro do compressor devagar e forçar o conjunto todo para baixo em um movimento único;
13. Se tudo correr bem a membrana descerá até o limite. Então, desconecta-se a peça cilíndrica da membrana, retira-se o bastão cilíndrico, colocam-se três anéis (peça 1 Figura 51) pelo topo da sonda e atarraxa-se a peça 5 da Figura 51. Com isto, pode-se conectar a mangueira hidráulica e aplicar pressão pela caixa de controle, possibilitando o ajuste final da membrana.

A Figura 66 apresenta algumas fotos do procedimento de colocação da membrana.



Figura 66 – Fotos do procedimento de colocação da membrana.

## 4.6. Calibrações das Sondas Pressiométricas

### 4.6.1. Calibração do Sensor de Temperatura

Foram empregadas duas metodologias de calibração do sensor de temperatura. Na primeira foi utilizada uma caixa térmica (isopor) com uma fonte de calor adaptada internamente e na segunda empregou-se uma estufa que foi adaptada com uma controladora com rampas e patamares (Soares, 2004) para realização de ensaios triaxiais com temperatura controlada.

Na metodologia 1 a sonda SP-1 sem a membrana foi colocada dentro do isopor e apoiada em pequenos cavaletes de madeira para posicioná-la o mais alto possível dentro da caixa térmica. Em seguida, empregou-se uma estação de solda, com controle de temperatura, para acionar um ferro de solda, que foi colocado dentro do isopor funcionando como resistência térmica. Além disto, um pequeno termopar foi fixado ao lado do sensor LM35 na sonda (Figura 63b) e ligado a um termômetro digital ao lado de fora da caixa térmica. Além disto, a mangueira do pressiômetro e os cabos eletrônicos foram introduzidos por um orifício na lateral do isopor até o corpo da sonda.

O circuito eletrônico e o sistema de aquisição foram ligados, registrando-se leituras iniciais de voltagem e temperatura com a caixa térmica aberta para a temperatura ambiente (laboratório de solos). Após isto, com a caixa de isopor tampada, o procedimento de leitura foi repetido à medida que se aumentava a temperatura na estação de solda, esperando-se um certo tempo para a equalização da temperatura no interior caixa térmica. Com este sistema chegou-se até 40°C. A calibração do sensor da sonda SP-I foi realizada empregando este procedimento. As leituras encontradas e o melhor ajuste de reta para os dados estão apresentados na Figura 67.

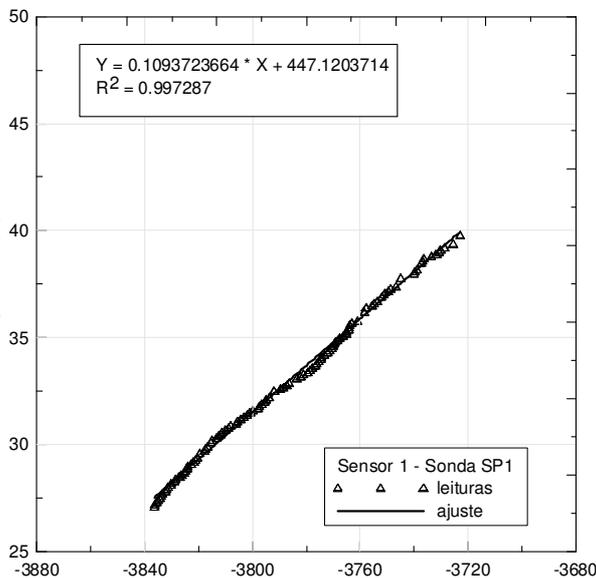


Figura 67 – Resultados da calibração do sensor de temperatura da sonda SP1.

Na metodologia 2 a sonda SP-2 foi colocada dentro de uma estufa que é originalmente empregada para ensaios triaxiais com temperatura controlada. Neste caso, o mesmo termopar e termômetro digital da análise anterior foram empregados e a mangueira e cabos eletrônicos conectados à sonda por uma abertura lateral. Em seguida, o controlador da estufa foi ajustado para patamares específicos de temperatura e as respostas no termômetro e no sistema de aquisição foram tomadas. Os resultados estão apresentados na Figuras 68.

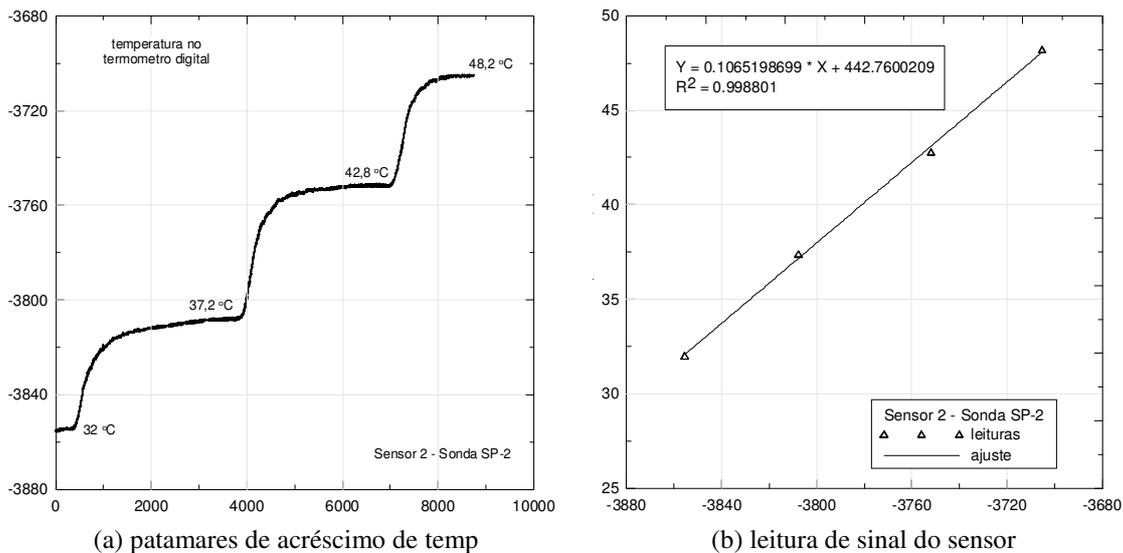


Figura 68 – Resultados da calibração do sensor de temperatura da sonda SP2.

A Tabela 16 traz o resumo das equações de calibração obtidas para as duas sondas.

Tabela 16 – Resumo das equações de calibração dos sensores de temperatura.

Sensor Sonda SP-1	Sensor Sonda SP-2	Observação
$y = 0.1094 \cdot x + 447.12$	$y = 0.1065 \cdot x + 447$	y – temperatura (°C) x – sinal do sensor (mV)
$R^2 = 0.9972$	$R^2 = 0.9988$	

#### 4.6.2.

#### Calibração dos Transdutores de Deslocamentos (HET)

##### 4.6.2.1.

##### Metodologia

A calibração do sistema de medição de deslocamentos, cujo sensor de efeito Hall empregado foi descrito anteriormente, foi realizada simulando o procedimento de ensaio, onde o braço acompanha a expansão da membrana e a distancia relativa entre a ponta do braço aberto e a ponta do braço fechado corresponde ao deslocamento radial. Portanto, deve-se calibrar o deslocamento relativo contra a saída de voltagem para cada SMD. O procedimento de calibração

será descrito a seguir e foi realizado para um braço por vez enquanto os outros permaneceram contraídos.

A sonda foi colocada em uma posição horizontal com todas as partes montadas com exceção da membrana. Em seguida, os cabos elétricos foram unidos em suas respectivas extremidades, isto é, na sonda e no SEG por meio dos seus conectores. Então, uma ponta da mangueira hidráulica foi atarraxada ao topo da sonda e a outra ao SEG e os cabos elétricos do SEG e do transdutor de pressão foram, então, conectados à caixa eletrônica de amplificação, que por sua vez forneceu a saída digital de sinal para um computador portátil. Desta forma, estava garantida durante a calibração a conectividade de aterramento desde a sonda, passando pela mangueira (por meio da proteção radial metálica que lhe constitui) e pelo SEG até a caixa eletrônica. Todavia, como de fato o sistema não estava cravado, portanto não estava “aterrado”, foi necessário atar um cabo ao corpo da sonda ligando-o diretamente no pino terra de uma tomada convencional, com isto foi possível evitar interferências de ondas eletromagnéticas de altas frequências.

Inicialmente empregou-se um traçador de altura, como o mostrado na Figura 69a, para medir o deslocamento relativo do braço. Porém, notou-se que a proximidade do corpo metálico da ferramenta ao imã do braço durante o ensaio modificava o campo magnético do sistema produzindo resultados pouco confiáveis levando ao descarte desta metodologia de calibração.

Como alternativa, um micrômetro comumente usado para calibrar LVDTs foi montado verticalmente em um pedestal de madeira como pode ser observado na Figura 69b. Então, na extremidade móvel do micrômetro foi adaptada uma pequena placa de acrílico onde o braço do SMD era apoiado. Com isto, o avanço ou recuo do corpo móvel do micrômetro (giro) permitia a extensão ou contração do braço do SMD, sem influenciar nas leituras. Por isto, todas as calibrações dos HETs foram feitas com esta adaptação.

A calibração foi feita individualmente para cada braço enquanto os outros eram mantidos em posição retraída. O micrômetro foi posicionado de tal forma a varrer toda a faixa de trabalho do SMD, isto é, para o braço retraído e totalmente expandido e as leituras tomadas até o deslocamento máximo do braço ser atingido e daí em mesmos decrementos até a posição inicial. No programa de aquisição as leituras foram feitas a cada segundo e no modo “instantâneo”, porém há também a possibilidade de realizar leituras médias no intervalo de tempo escolhido. Nas

calibrações, para cada incremento ou decremento no micrometro e após a estabilização do sinal, as respectivas leituras em mV eram anotadas. Posteriormente, foram feitas quatro calibrações para cada sensor para verificar a histerese e repetibilidade. Após cada uma delas o circuito foi desligado e religado após cinco minutos, reiniciando a calibração.

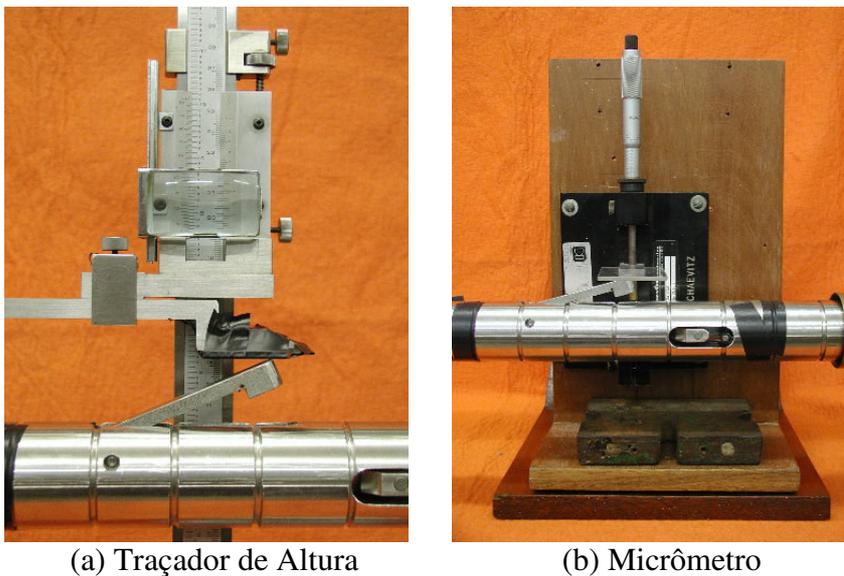


Figura 69 – Dispositivos empregados na calibração dos transdutores de deslocamento.

#### 4.6.2.2. Ajuste no Programa de Aquisição

Notou-se que havia um intervalo de tempo expressivo entre o movimento do braço e a resposta mostrada pelo programa *Picolog for Windows* fornecido com o conversor PICO ADC16. Não se sabe exatamente se esta condição é característica do conversor, ou é devida à configuração do condicionamento eletrônico ou causada pela adaptação da porta USB do computador pessoal como uma porta serial (RS-232) por meio de um adaptador comercialmente disponível. De uma forma ou de outra, optou-se por mudar a resolução de cada canal para 13bits (velocidade de aquisição 78ms) para possibilitar uma resposta mais rápida no sistema.

Durante as calibrações, a aquisição via *software* foi configurada para o modo instantâneo e leituras a cada segundo. Então, para cada calibração um arquivo foi configurado no programa de aquisição indicado os canais

monitorados, resolução, intervalo de aquisição e todas as informações necessárias. O programa fornece a possibilidade de uma saída gráfica e de planilha com as leituras atualizadas automaticamente como o exemplo da Figura 70.

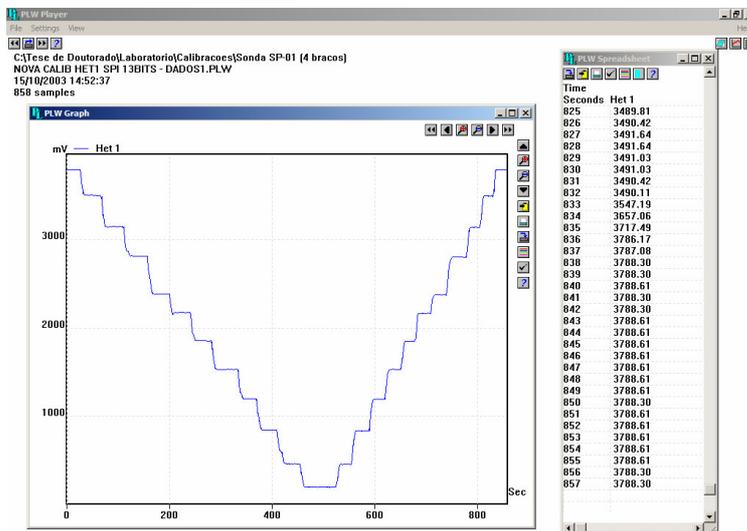


Figura 70 – Exemplo da saída gráfica do programa *PicoLog* durante calibrações do transdutor de deslocamento.

#### 4.6.2.3. Ajuste no Circuito de Amplificação

Com a opção pela mudança de resolução para 13bits a faixa de aquisição de voltagem no conversor foi curiosamente ampliada para valores superiores aos  $\pm 2,5V$  padrão para 16bits, demandando novos ajuste para o valor de voltagem de referência. Através de diversas análises preliminares, que serão suprimidas neste texto, foi observado que ajustando o *offset* inicial (braço contraído) no potenciômetro de cada canal no circuito para um valor próximo ao limite do amplificador operacional, propiciava uma saída de sinal dos HETs bem mais constante. Os valores são diferentes para cada sensor e dependem do alinhamento com os ímãs (saída inicial) e do ajuste de ganho. Porém estão próximos dos 3780mV e apresentam uma curva de variação com o tempo bem peculiar.

Os sinais ajustados para próximo do limite do potenciômetro possuem uma saída bem característica como aquela mostrada na Figura 71(b). O sinal sem ajuste inicial (Figura 71(a)) apresenta uma variação (*drift*) que produz grande histerese

nas leituras caso seja utilizado. A Figura 71 refere-se a uma condição de braço mantido recolhido.

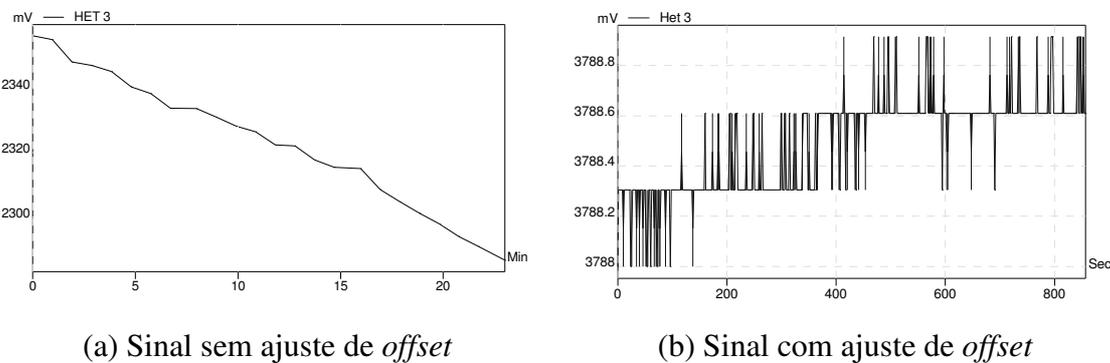


Figura 71 – Comparação entre sinais com e sem ajuste de *offset* para a condição de braço recolhido.

É extremamente importante checar o ajuste inicial do sinal, pois pode ocorrer a situação onde os sinais estão de acordo com a Figura 71(b), porém o potenciômetro está de fato fornecendo valores superiores aos prescritos. Isto pode acontecer quando se gira em demasia o parafuso de ajuste do potenciômetro. Este excesso de voltas não aparece no sinal, mas está contabilizado na voltagem fornecida pelos potenciômetros. Além disto, é normal que ocorra quando se troca de sonda, entre campanhas de campo onde o circuito é desligado por muito tempo ou quando a bateria está fraca. O efeito disto pode ser significativamente prejudicial, pois induz à resposta inicial mais lenta ou equivocada do braço móvel, isto é, o braço movimenta-se, porém não há variação do sinal de saída correspondente até se vencer as “voltas excedentes do potenciômetro”, o que induz a erros. Portanto, este ajuste deve ser realizado antes de cada calibração e de cada investigação de campo. Além disto, o circuito deve ser deixado ligado por pelo menos 5min antes do ajuste ou uso do mesmo para equilíbrio térmico dos sensores.

O aumento do valor do sinal se dá pelo giro do parafuso de controle no potenciômetro no sentido horário (Figura 59) e a diminuição no sentido inverso. Deve-se avaliar a saída inicial e proceder com diminuições e/ou aumentos até atingir um valor de referência ideal para cada sensor. O perfeito ajuste depende da experiência e sensibilidade do operador nesta tarefa.

#### 4.6.2.4. Resultados das Calibrações

Os resultados das calibrações dos SMD das sondas SP1 e SP2, realizadas em novembro de 2003, estão apresentados nas Figuras 72 e 73, respectivamente, na forma de curvas *deslocamento* ou *deformação da cavidade x Δvoltage*. A deformação da cavidade ( $\epsilon_c$ ) é definida como a variação do raio da cavidade em relação ao seu valor inicial. Aqui foi considerado que a cavidade inicial tinha raio de 27mm ( $R_{sonda} + e_{memb}$ ) e que não há afinamento da membrana durante a expansão. Caso seja considerado este efeito, então o valor de  $\epsilon_c$  dos gráficos de calibração devem ser modificados para aquela correção.

Para ambas as sondas as curvas de calibração foram polinômios do 2 grau tanto para expansão quanto para retração dos braços, com excelente coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e inexpressiva histerese. Um resumo das equações obtidas nas calibrações de novembro de 2003, anteriores à campanha de investigação de campo em RSU, consta na Tabela 17.

Cabe ressaltar que, desde então, alguns Hets já foram trocados ou alterados. Portanto, novas calibrações devem ser feitas antes de qualquer outra campanha.

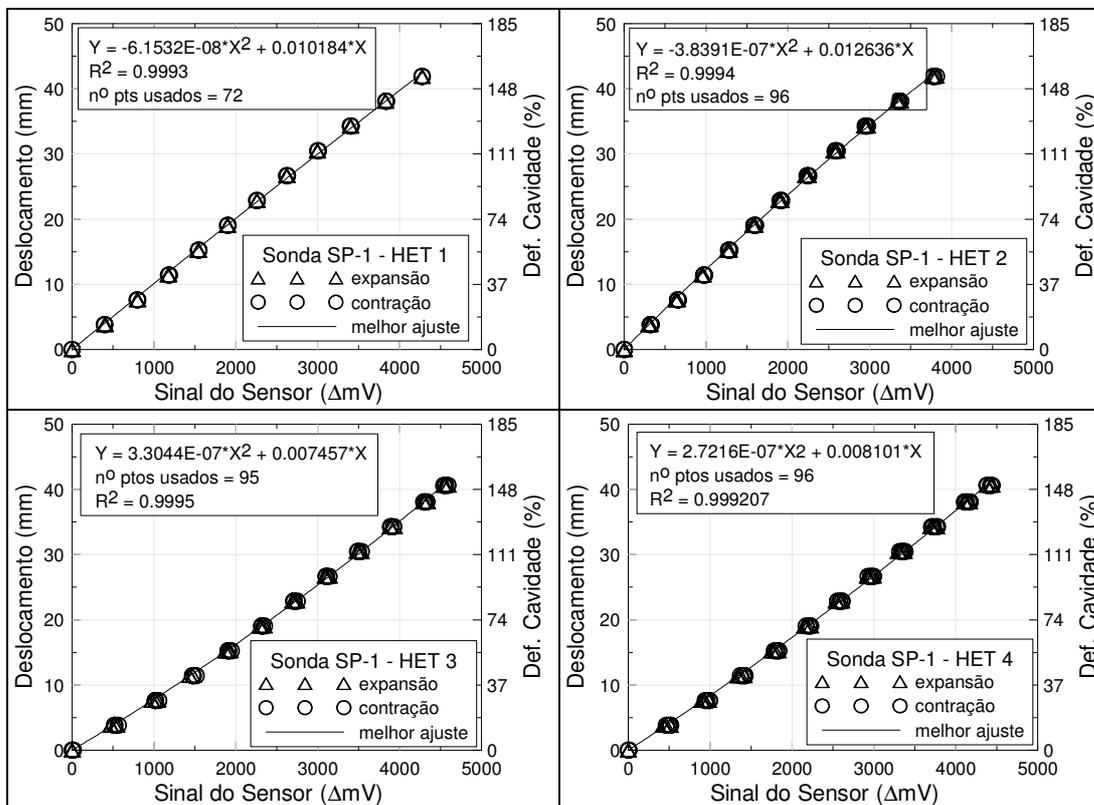


Figura 72 – Resultados da calibração dos transdutores de deslocamentos da sonda SP1.

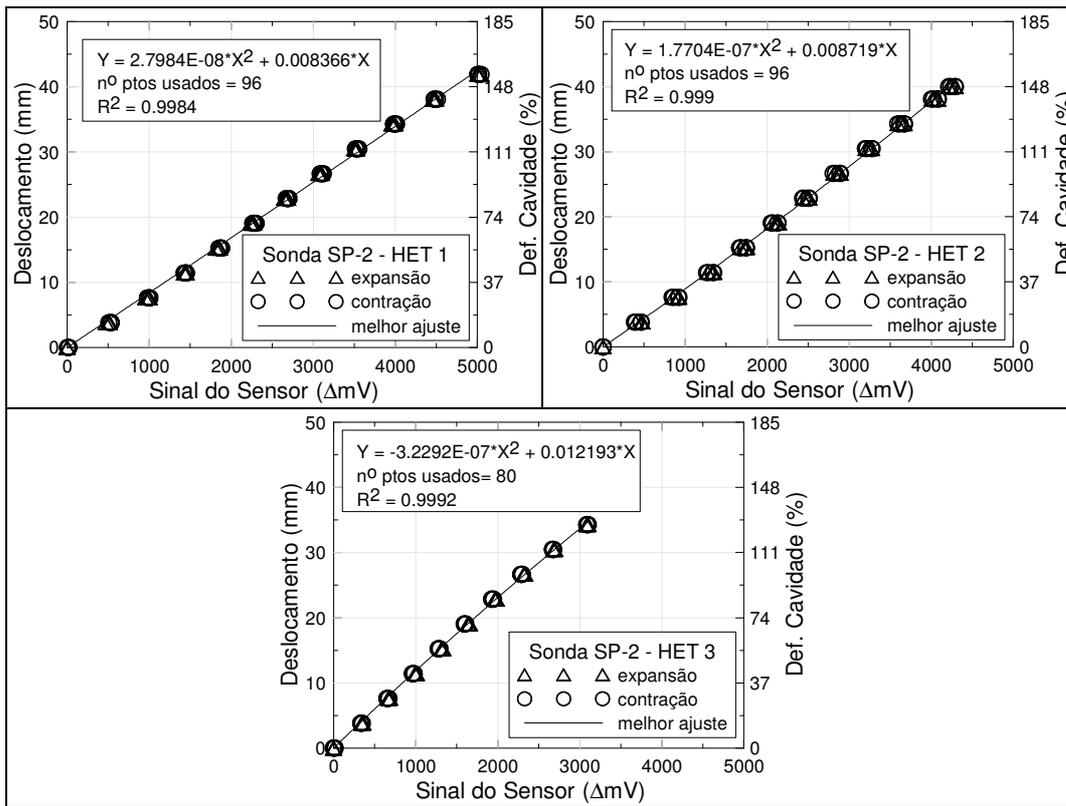


Figura 73 – Resultados da calibração dos transdutores de deslocamentos da sonda SP2.

Tabela 17 – Resumo das calibrações dos SMD realizada em novembro/2003.

Het	SP1	SP2	Obs
	Equação de Calibração	Equação de Calibração	
1	$y = -6,1532 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 + 0,01018 \cdot x$	$y = 2,7984 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 + 0,00836 \cdot x$	y = desloc. (mm) x = ΔmV x = mV <sub>ref</sub> - mV
2	$y = -3,8393 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 0,01263 \cdot x$	$y = 1,7704 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 + 0,00872 \cdot x$	
3	$y = 3,3044 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 0,00745 \cdot x$	$y = -3,2292 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 0,01219 \cdot x$	
4	$y = 2,7216 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 0,00810 \cdot x$	-	

O valor  $mV_{ref}$  da tabela 17 é a voltagem de referência com o braço fechado (*offset* inicial) ajustado no potenciômetro e mV é o sinal corrente. À medida que os braços abrem o sinal corrente é reduzido até valores negativos referentes a abertura máxima do braço e, portanto, ΔmV aumenta.

**4.6.2.5.****Avaliação do Sistema de Medição de Deslocamento (SMD)**

O desempenho dos SMD construídos foi avaliado em termos de sensibilidade, repetibilidade e histerese dos sinais de saída. A seguir são apresentadas algumas definições, porém as tabelas de análise encontram-se no Apêndice I deste trabalho.

**(i) Sensibilidade**

De acordo com Clarke (1995) a sensibilidade dos transdutores de deslocamentos em pressiômetros é referida em termos de mV/mm ou ainda como mV/%, onde o símbolo porcentual refere-se à deformação da cavidade cilíndrica que é definida como a razão entre variação de deslocamento e o raio inicial da sonda com a membrana. O condicionamento eletrônico de sinais aumentou consideravelmente a sensibilidade do sistema projetado, cujo valor médio observado durante as calibrações para ambas as sondas foi da ordem de 100mV/mm. A Tabela 18 apresenta o resumo dos valores de sensibilidade de cada transdutor de deslocamento das sondas.

Tabela 18 – Sensibilidade dos transdutores de deslocamento das sondas pressiométricas.

HET	Sonda SP-1		Sonda SP-2	
	mV/mm	mV/%	mV/mm	mV/%
1	102,03	27,55	119,71	32,32
2	100,73	27,20	106,45	28,74
3	112,20	30,29	90,16	24,30
4	108,51	29,30	-	-
média	105,87	28,59	105,44	28,47

**(ii) Repetibilidade**

Expressa o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de uma mesma grandeza efetuadas sob as seguintes condições de repetição:

- mesmo operador;
- mesmas condições ambientais (local, temperatura e pressão);
- repetição em curto período de tempo.

Matematicamente é expressa pela diferença entre as leituras máxima e mínima de um universo de amostragem em relação ao valor médio de leitura (Equação 29).

$$R(\%) = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{F} 100 \quad \dots(29)$$

em que

$R$  – repetibilidade;

$V_{\max}$  – valor de leitura máxima no espaço amostral;

$V_{\min}$  – valor de leitura mínima no espaço amostral;

$F$  – faixa de leitura, valor médio.

O sistema projetado apresentou boa repetibilidade de resultados durante as calibrações como pode ser observado nos valores percentuais descritos nas tabelas contidas no Apêndice I. Nestes casos, os resultados de  $R(\%)$  estiveram próximos de 100% na maioria das calibrações, mostrando que as diferenças entre as leituras máximas e mínimas foram extremamente pequenas, demonstrando a excelente repetibilidade.

### **(ii) Histerese**

É o desvio máximo obtido entre sinais de saída indicados para uma mesma situação de leitura de um sensor, por exemplo, no carregamento e descarregamento ou na expansão e contração do mesmo, sendo dada por:

$$H(\%) = \frac{x_e - x_c}{F} 100 \quad \dots(30)$$

em que:

$H$  – histerese;

- $x_e$  – leitura média na expansão do braço;
- $x_c$  – leitura média na contração do braço;
- $F$  – faixa de leitura ou *full scale* (FS) do transdutor.

A faixa de leitura ( $F$ ) adotada para avaliação da histerese do transdutor foi o *full scale* (FS) de cada um, isto é, o valor máximo médio de  $\Delta V$ . Os resultados encontrados, também contidos nas tabelas do Apêndice I, mostram que a histerese observada foi bastante pequena e desprezível, da ordem de 2% FS, demonstrando a confiabilidade do sistema projetado.

#### 4.6.3. Calibração dos Transdutores de Pressão

Dois transdutores de pressão foram calibrados para emprego com o PC-RSU: um, do fabricante *Druke*, com pressão máxima de trabalho de até 1.500kPa e outro, do fabricante *Schaevitz*, com pressão máxima de trabalho de 3.500kPa.

O transdutor de pressão é atarraxado ao corpo do SEG e fica na superfície durante o ensaio, sendo alimentado com 9V proveniente da caixa eletrônica de onde também recebe amplificação de sinal.

O procedimento de calibração dos transdutores de pressão é padrão no laboratório de geotecnia da PUC-Rio. Para o caso, conecta-se o transdutor ao calibrador *Budenberg*, de onde se aplicam acréscimos controlados de pressão pela colocação de pesos padronizados no calibrador. Então, a pressão é transferida hidraulicamente para o transdutor que se deseja calibrar. A Figura 74 apresenta uma foto do *Budenberg* empregado e a Figura 75 traz o resultado das calibrações com os dois transdutores.

Os resultados das calibrações mostraram a linearidade nas leituras, a excelente repetibilidade e inexistência de histerese nos ciclos de pressão, conforme é normalmente observado em transdutores do gênero.

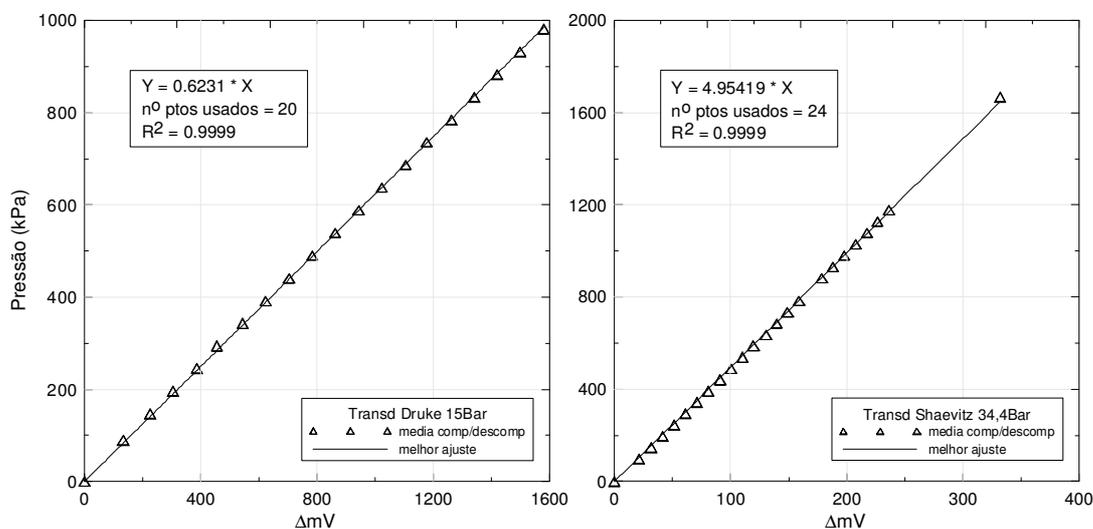
Figura 74 – Calibrador *Budenberg* para transdutores de pressão.

Figura 75 – Resultados das calibrações dos transdutores de pressão.

#### 4.6.4. Avaliação da Conectividade de Pressão

A pressão de gás é aplicada a partir da superfície pela caixa de controle, passando pelo SEG e daí por 22m de mangueira (com cabo elétrico dentro) até a sonda pressiométrica. Com esta configuração, há possivelmente dois pontos de estrangulamento de gás durante este caminho localizados em ambas as extremidades da mangueira onde estão as conexões. Nestes pontos a proteção de borracha dos cabos elétricos que passam por dentro da mangueira foi retirada com o intuito de diminuir o diâmetro do cabo e aumentar o espaço livre entre este e a parede interna das conexões. Mesmo assim achou-se necessário avaliar a velocidade de resposta na sonda para uma dada variação de pressão na superfície. Esta avaliação foi relevante para indicar a velocidade mínima de amostragem no

programa de aquisição e o tempo necessário para as pressões no caixa de controle e na sonda pressiométrica se estabilizarem.

Para tanto, foi construída uma pequena câmara a partir de um tubo aço de parede espessa, fechada nas extremidades com tampas circulares de aço atirantadas, onde a sonda devidamente conectada a mangueira de pressão e sem a membrana era inserida (Figura 76(a)). Em uma das extremidades da câmara um transdutor de pressão foi conectado para medir a pressão no interior da mesma, representando a pressão no final da mangueira. Desta maneira foi possível avaliar qualquer diferença entre as pressões no começo e no final da linha pressurizada e principalmente o tempo necessário para equalização.

O equipamento todo foi montado e a caixa de controle ligada ao compressor de ar. Em seguida, pequenos e rápidos incrementos de pressão de aproximadamente  $0,5\text{kg/cm}^2$  ( $49,03\text{kPa}$ ) foram dados e mantidos por cerca de 2min. Os dados foram adquiridos a cada segundo no computador e estão apresentados na Figura 76(b).

Na Figura 76(c) está ilustrada a variação relativa e percentual entre as pressões aplicadas na caixa de controle e a lida na câmara cilíndrica. Verifica-se que há uma diferença instantânea considerável entre os valores de pressão, porém tendendo a se igualar logo em seguida ou a manter uma diferença constante com o tempo. Esta diferença percentual teve seu maior valor (6%) no primeiro estágio de carga e no último estágio de descarregamento, isto é, para valores baixos de pressão. Nos demais estágios esta diferença não foi maior que 2% e menor que 0,2%.

A Figura 76(d) ilustra o tempo necessário para as diferenças entre as pressões lidas no SEG e na câmara tornarem-se constantes em quatro estágios de carregamento traçados na mesma escala. As linhas cheias representam a pressão no SEG e as linhas tracejadas a pressão dentro da câmara. Pela análise desta figura é possível verificar as pressões, ou a diferença entre elas, somente se igualam depois de 10 a 15 segundos do momento em que se aplica o gradiente na caixa de controle. Portanto, fica evidente que amostragens no programa de aquisição em intervalos inferiores a este tempo podem implicar em leituras inexatas nos ensaios de campo. Além disto, acréscimos de pressões em velocidades muito rápidas podem implicar em não impor ao meio investigado, as magnitudes que de fato se desejam.

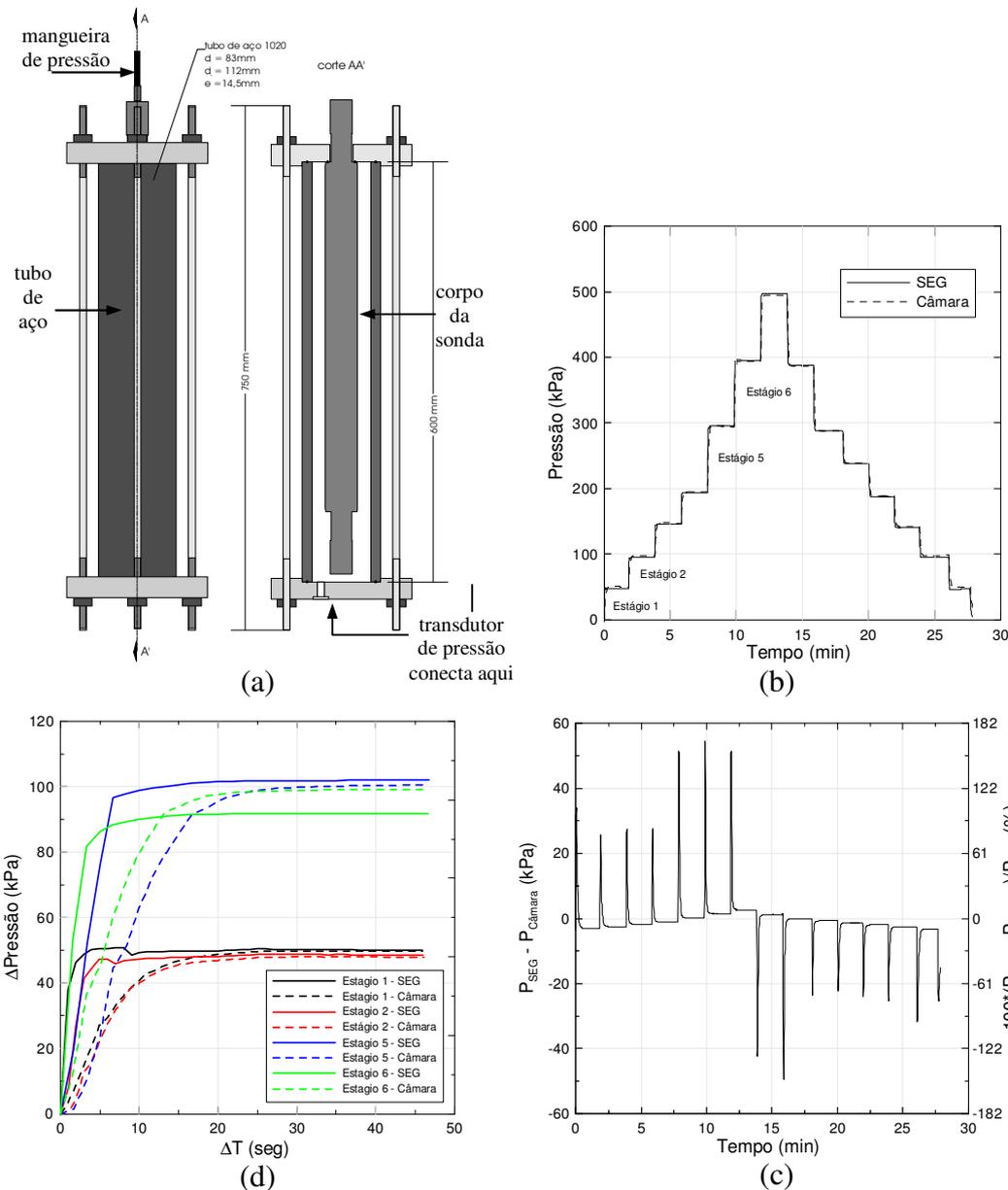


Figura 76 – Detalhe da câmara para aferir velocidade transferência de pressão (a); resultados do ensaios (b),(c) e (d)

#### 4.6.5. Calibração da Membrana Semiflexível

##### 4.6.5.1. Rigidez da Membrana

Rigidez da membrana é a pressão necessária para inflá-la ao ar. A sua calibração é relevante quando se investigam solos moles, como argilas orgânicas. Porém, apesar de não ser um ponto crítico quanto se testam argilas rijas, areias densas ou rochas brandas, a correção desta é usual dada a sua própria simplicidade

executiva. Deve-se descontar o seu valor nas interpretações dos ensaios a partir de curvas de calibração realizadas antes e após cada campanha de campo.

De acordo com Clarke (1995) a calibração deve ser realizada na mesma temperatura do local investigado, pois as características da membrana são dependentes da temperatura, a sonda deve estar montada e vertical e, no caso de sondas com medição volumétrica, a unidade de controle deve estar ao mesmo nível da sonda para evitar efeito do peso da coluna de água na mangueira.

A membrana é inflada e desinflada seguindo o procedimento de ensaio, seja ele de tensão ou deformação controlada, e as leituras de pressão e deslocamento de cada braço móvel da sonda até o máximo permitido são tomadas ao final de cada intervalo. Clarke (1995) sugere incrementos de deslocamentos equivalentes a 10% da expansão máxima sejam impostos, mantendo-os por 1min.

A forma da curva de calibração é dependente do tipo de membrana empregada, idade, número de testes executados e temperatura ambiente. Porém, é composta de duas partes, uma inicial que representa a pressão de descolamento da membrana (*lift-off*) e outra que representa pressões para expansões maiores. Geralmente a curva de calibração não é linear, porém em alguns casos é aceitável empregar a melhor linha de ajuste do trecho linear. A rigidez da membrana é referida em termos de  $\text{kN/m}^2/\%$  de deformação da cavidade. A Figura 77 fornece exemplo de resultados disponíveis na literatura sobre calibrações de membranas usadas em pressiômetros (Clarke, 1995).

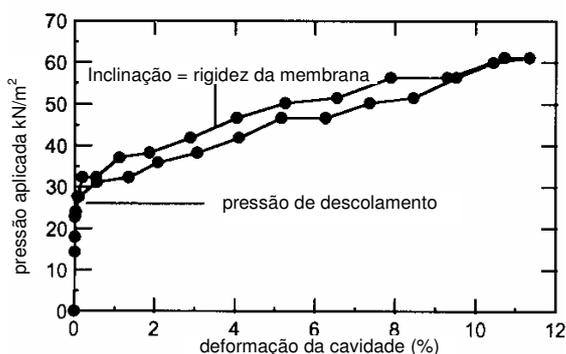


Figura 77 – Exemplo de curva de calibração da rigidez de membranas (Clarke, 1995).

Infelizmente dados a respeito de alguns ensaios destrutivos realizados com membranas desta pesquisa foram perdidos. Todavia indicaram que a membrana não suportou deslocamentos da ordem de 25 a 30mm. Portanto, assumiu-se um

patamar de cerca de 20mm como um limite seguro de ensaio sem ruptura e perda de material, considerando a quantidade limitada de membranas disponíveis. Em um dos ensaios de calibração a membrana apresentou uma deformação pontual extremamente elevada que culminou no estouro da mesma naquele local, possivelmente devido a defeitos na fabricação à torção e dano durante a colocação da membrana na sonda. Infelizmente não há documento fotográfico do ocorrido, porém a Figura 78 a seguir mostra uma das sondas após a ruptura da membrana com deslocamento radial de aproximadamente 25mm.

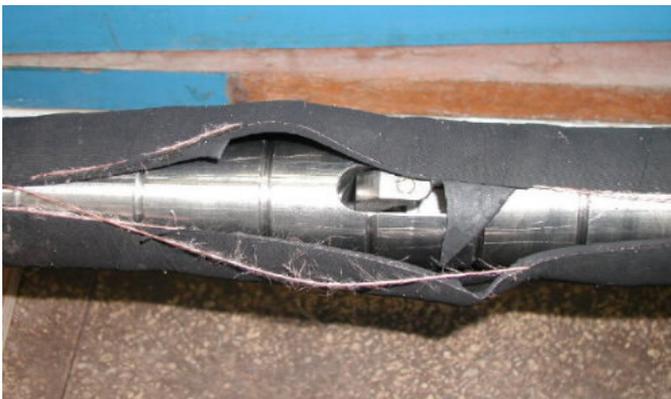


Figura 78 – Membrana após ensaio destrutivo.

Nas calibrações adotou-se o emprego de incrementos de pressão de cerca de 10kPa, sendo mantidos por 30 segundos e logo em seguida lidos os sinais dos Het's e transdutor de pressão no programa de aquisição. A Figura 79 apresenta uma evolução em fotos do ensaio de expansão da membrana ao ar com a sonda SP2.

Exemplos de resultados dos ensaios de expansão da membrana ao ar estão apresentados nas Figuras 80 a 82 em termos de *pressão de gás x deslocamento radial* ou *pressão de gás x deformação da cavidade*. Nestes gráficos não foi feita correção do afinamento da membrana. A Figura 80 exhibe os deslocamentos radiais produzidos por em cada Het separadamente, enquanto que a Figura 81 mostra a média dos deslocamentos e uma equação de ajuste média. Por sua vez, a Figura 83 exhibe separadamente os resultados lidos em cada transdutor de deslocamento e as curvas de ajuste na expansão, na contração e a média das duas sondas.

Nas correções dos dados de campo empregaram-se equações de ajuste distintas para as fases de expansão e contração do ensaio.

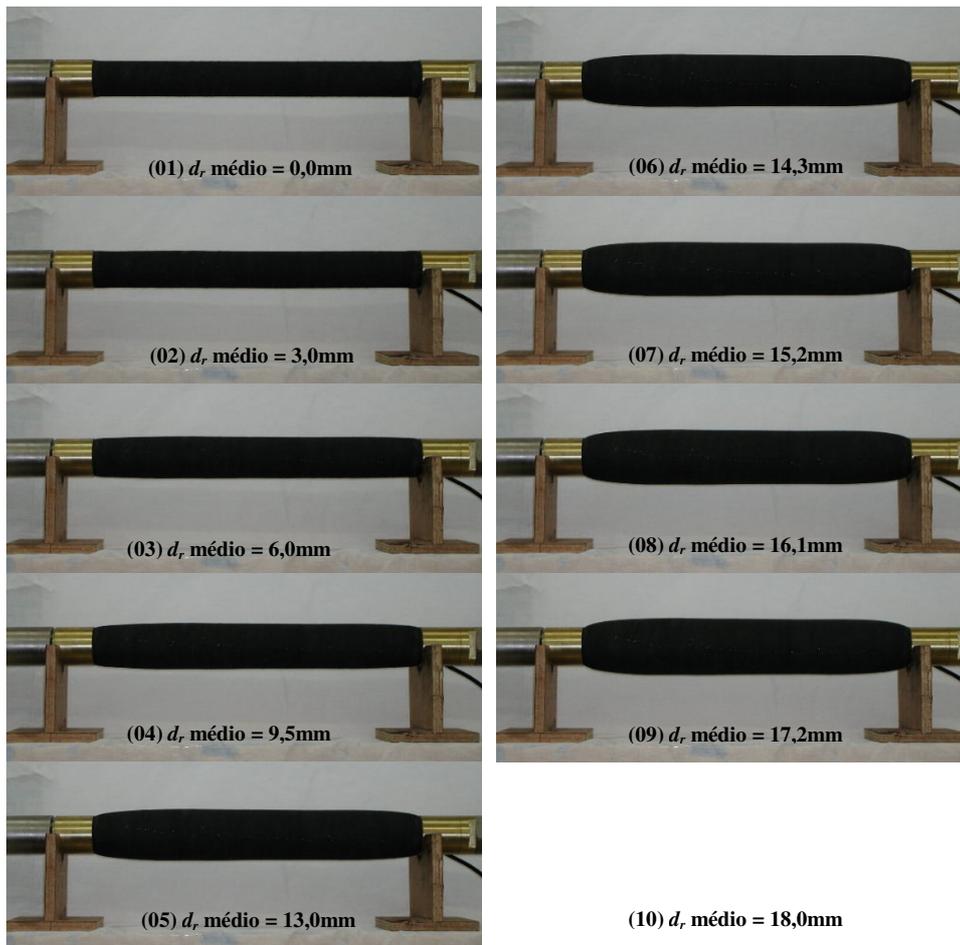


Figura 79 – Estágios de expansão da membrana durante ensaio de calibração da membrana – deslocamento radial ( $d$ ); média de todos os Het's (sonda SP2).

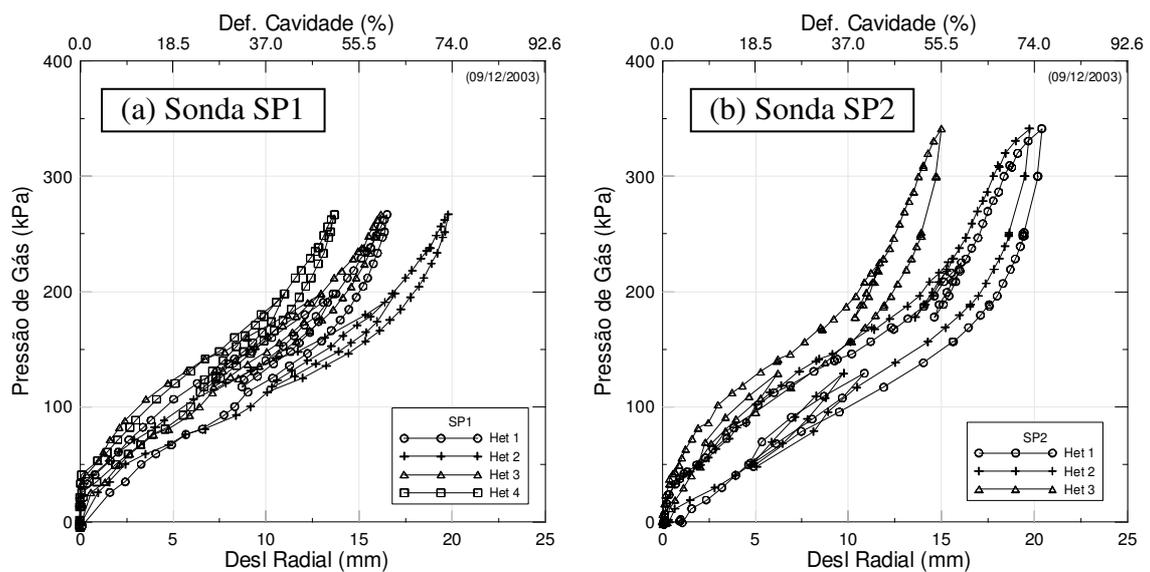


Figura 80 – Deslocamento radial de cada Het na expansão da membrana ao ar.

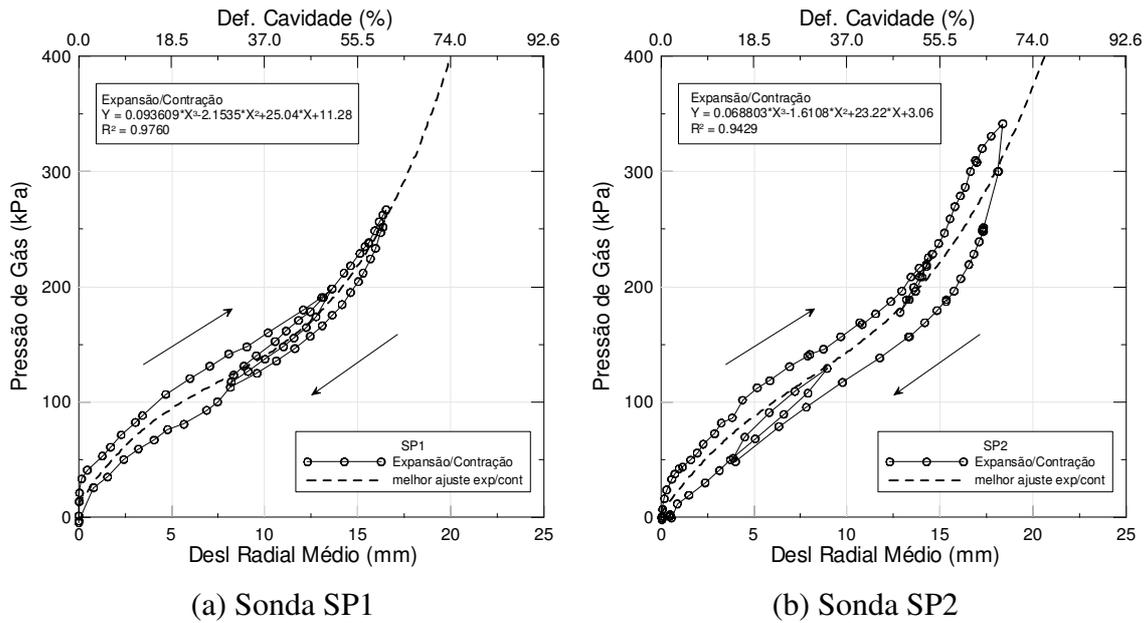


Figura 81 – Curva de ajuste do deslocamentos radiais médios no ensaio de expansão da membrana ao ar.

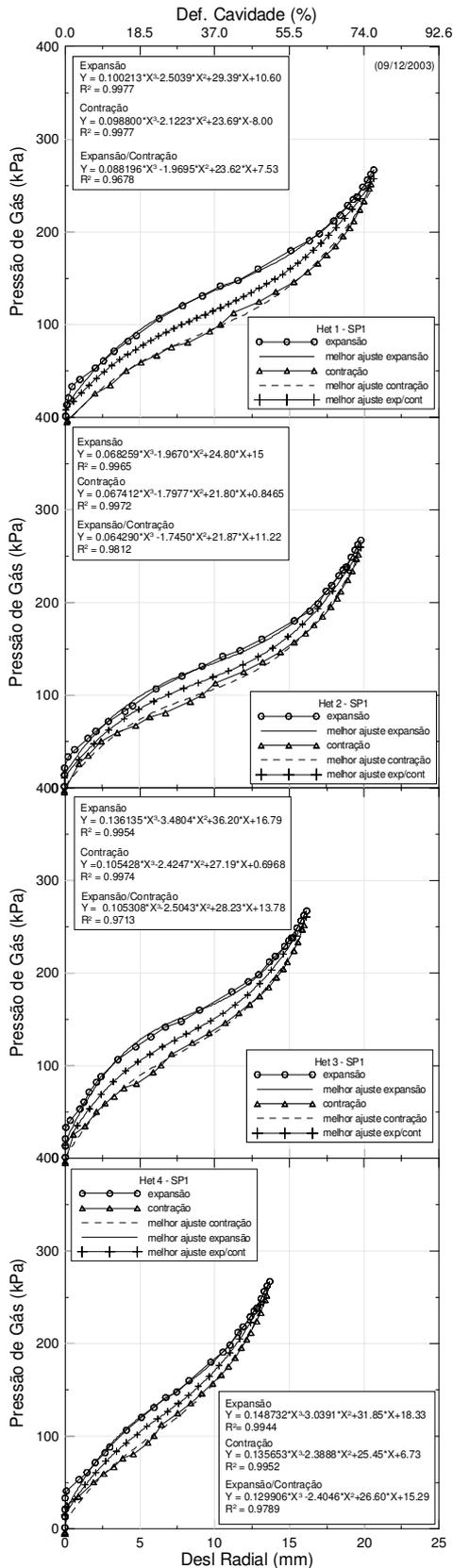
#### 4.6.5.2.

#### Correção do Afinamento da Parede da Membrana

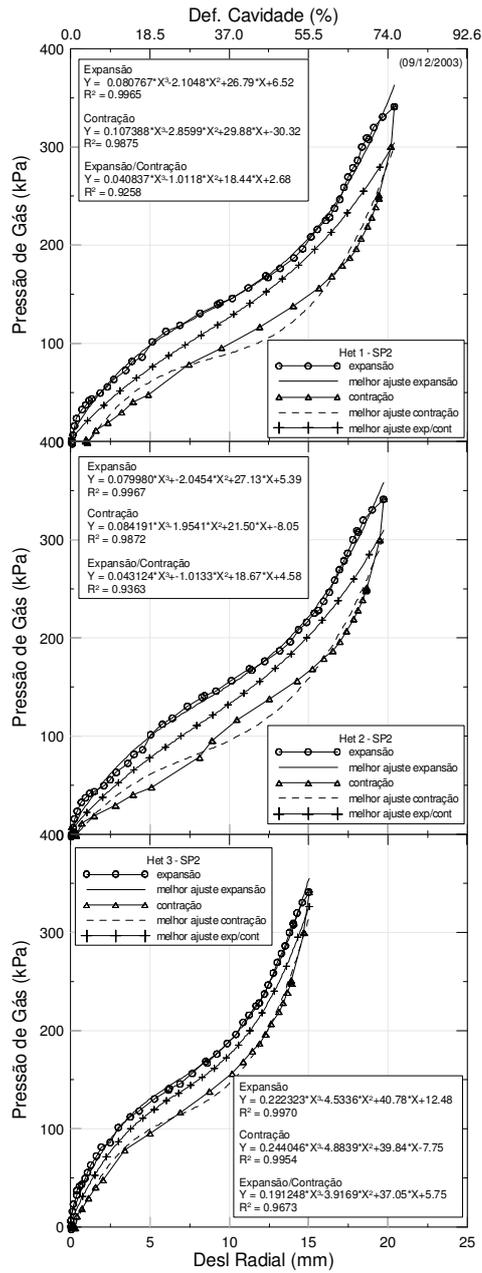
O afinamento da parede da membrana ocorre à medida que ela se expande e é função da variação diametral da membrana e não da variação de pressão.

Segundo Clarke (1995), assume-se que o volume da membrana é constante e, portanto, não é necessário este tipo de correção a sondas com sistemas de medição de deslocamentos por variação volumétrica.

Para explicar a metodologia de correção, seja uma sonda pressiométrica montada já com a membrana onde  $di_0$  é o diâmetro interno do corpo da sonda (sem membrana),  $em_0$  é a espessura da membrana e  $de_0$  é o diâmetro externo ( $de_0 = di_0 + em_0$ ). A medida em que a pressão interna na sonda é acrescida, a membrana expande-se e o diâmetro interno aumenta para  $di_f$  e a espessura da membrana diminui para  $em_f$ , produzindo um novo diâmetro externo  $de_f$ . ( $de_f = di_f + em_f$ ). Com isto, o comprimento teste da membrana que era  $l_0$  aumenta para  $l_f$  devido às restrições nas extremidades da sonda. Considerando a membrana incompressível (Clarke, 1995), o volume inicial da membrana que era  $Vm_0$  permanece inalterável podendo ser calculados pelas Equações 31 e 32.



(a) Sonda SP1



(b) Sonda SP2

Figura 82 – Curvas de ajustes por transdutor: na compressão, na expansão e em todos os pontos

$$Vm_0 = (\pi \cdot de_0^2 - \pi \cdot di_0^2) \cdot l_0 \quad \dots(31)$$

$$Vm_f = (\pi \cdot de_f^2 - \pi \cdot di_f^2) \cdot l_f \quad \dots(32)$$

Como o volume da membrana é assumido constante, então igualando as Equações 31 e 32, obtém-se a Equação 33 que foi escrita em função dos raios da cavidade.

$$re_f = \left( \frac{(re_0^2 - ri_0^2) \cdot l_0}{l_f} + ri_f^2 \right)^{0,5} \quad \dots(33)$$

Durante a expansão, a variação do comprimento da membrana é proporcional à variação do diâmetro da cavidade, isto é:

$$\Delta l = \Delta d_e \quad \dots(34)$$

$$l_f - l_0 = 2(re_f - re_i) \quad \dots(35)$$

A diferença entre os raios externos final e o inicial é o deslocamento medido no ensaio ( $\zeta_m$ ). Portanto, tem-se o comprimento final da membrana.

$$l_f = l_0 + 2\zeta_m \quad \dots(36)$$

Por outro lado, o raio interno final é a soma do raio interno inicial com o deslocamento medido, isto é:

$$ri_f = ri_0 + \zeta_m \quad \dots(37)$$

Substituindo-se as Equações 36 e 37 em 33 obtém-se o raio final considerando o afinamento da membrana.

$$re_f = \left( \frac{(re_0^2 - ri_0^2) \cdot l_0}{l_0 + 2\zeta} + (ri_0 + \zeta_m)^2 \right)^{0,5} \quad \dots(38)$$

Pode-se, então, calcular a deformação da cavidade ( $\varepsilon_c$ ) corrigida empregando o valor da Equação 38 e a definição da Equação 4.

O suposto efeito dos deslocamentos no afinamento da membrana estudada, segundo a teoria matemática apresentada acima (Clarke, 1995), pode ser inferido nos gráficos da Figura 83. Observa-se que para os máximos deslocamentos do SMD construído a membrana ficaria extremamente fina e bem mais suscetível a furos (Figura 83(a)).

Por outro lado, o efeito da perda de espessura na parede da membrana nos valores de  $\varepsilon_c$  (Figura 83 (b) e (c)) não parece ser tão latente, mesmo para deformações da ordem de 50%.

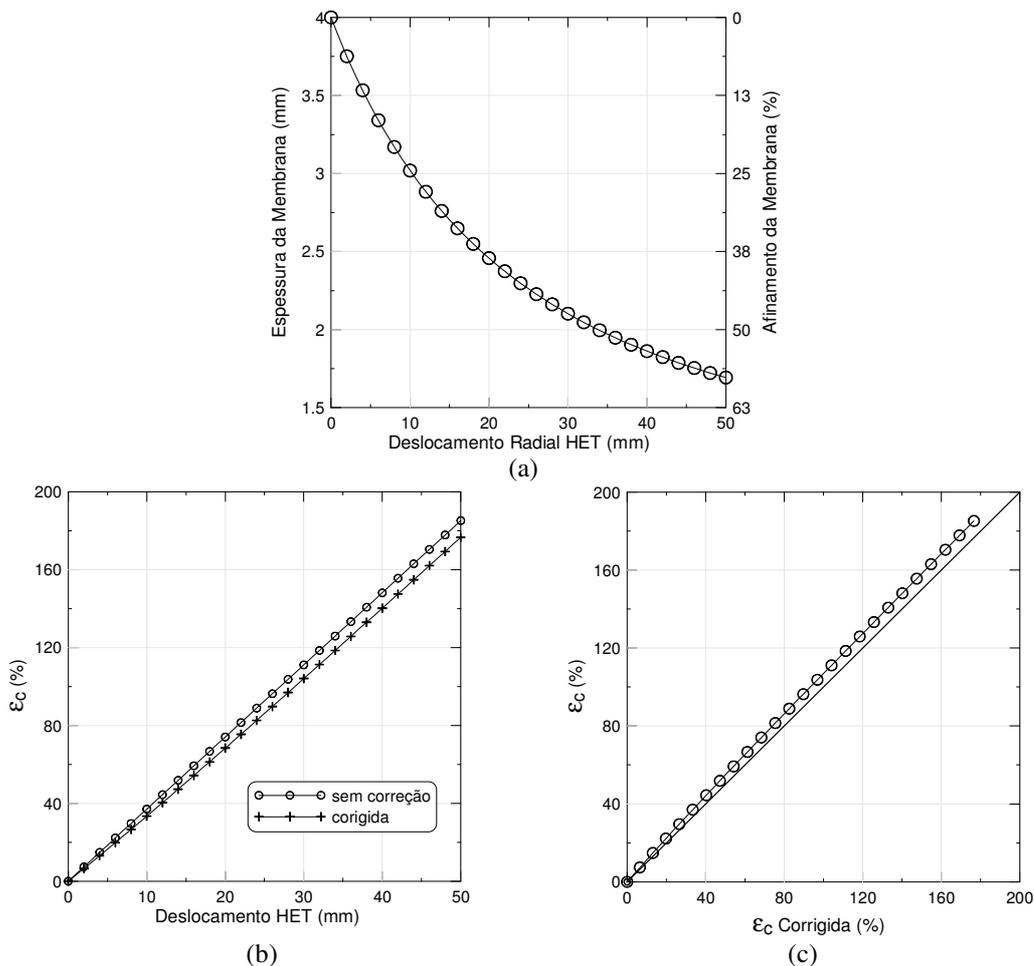


Figura 83 – Afinamento da membrana no PC-RSU segundo teoria de Clarke (1995)

## 5 Campanha de Investigações em ADRSU

### 5.1. Descrição do Local

A primeira utilização do aparelho desenvolvido nesta Tese ocorreu em uma campanha de investigação de campo realizada durante o mês de Fevereiro de 2004, no aterro controlado de disposição de resíduos urbanos da Muribeca, estado de Pernambuco. A campanha envolveu ensaios pressiométricos, de cone mecânico e SPT, bem como, análises de sólidos voláteis e teor de umidade.

O aterro da Muribeca está localizado na Região Metropolitana do Recife, no município de Jaboatão dos Guararapes. De acordo com Jucá (2003), a sua operação diária envolve montantes que chegam a cerca de 3.000 toneladas de resíduos domésticos e industriais, configurando-o como o maior aterro do estado de Pernambuco em operação, atendendo aos municípios do Recife e de Jaboatão. A sua área compreende 60 hectares, em um perímetro que abrange 3.848m (Lins, 2003).

O histórico de utilização da área como depósito de resíduos a céu aberto teve início em 1985. Entretanto, somente quase uma década após, em 1994, deu-se o início do processo de transformação do depósito em um aterro de disposição controlada, a partir da realização de investigações mais aprofundadas do meio físico local. Após a elaboração de um diagnóstico, foi possível submeter o empreendimento a um processo de recuperação ambiental que se iniciou, dentre outras, pela construção de 9 células, com 200x200m de largura e espessura de lixo variando entre 20 a 30m. A Figura 84 apresenta um desenho esquemático das células do aterro. Atualmente, a capacidade inicial de projeto já foi atingida o que justificou a reestruturação operacional do aterro com o preenchimento das vias de acesso com resíduo e elevação das células em até 30m (Maciel, 2003).

Desde 2002 o aterro da Muribeca trata o lixiviado produzido por meio de lagoas de estabilização (01 anaeróbia seguida de 03 facultativas) e de tratamento bioquímico por meio da fitorremediação. A produção diária de lixiviado do aterro

de 1 a 5  $l/s$ . O aterro possui ainda, uma lagoa de infiltração de lixiviado localizada no topo da Célula 05 que recebe o excesso do lixiviado para recirculação na célula.

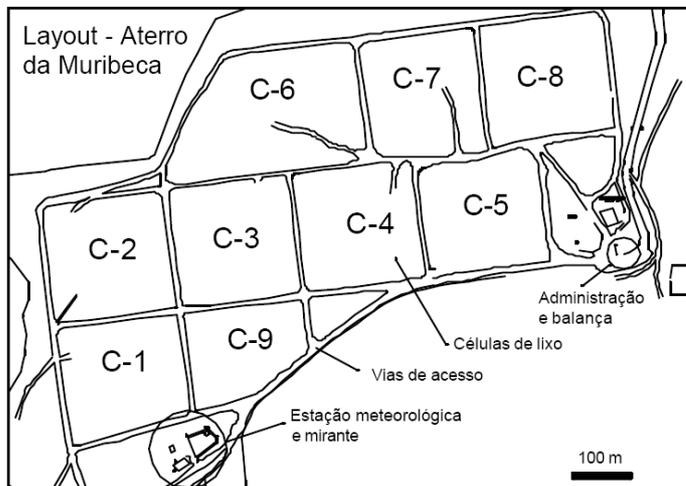


Figura 84 – Desenho esquemático das células do aterro da Muribeca

O aterro da Muribeca tem sido alvo de inúmeras pesquisas desenvolvidas pelo Grupo de Resíduos Sólidos (GRS) da UFPE (<http://www.grs-ufpe.com.br>) em nível de mestrado e doutorado, o que tem contribuído para torná-lo atualmente um dos mais bem estudados do país.

## 5.2. Células Experimentais

As células investigadas nesta campanha foram as de número 04 (C4) e 05 (C5), cujas localizações já foram esquematizadas na figura 84 anteriormente. A escolha das mesmas foi realizada tomando-se em conta informações já disponíveis nas mesmas e características do lixo depositado, bem como condições climáticas, operacionais e de segurança.

Os meses de janeiro e fevereiro de 2004 foram atípicos no que se refere ao índice pluviométrico na região nordeste do Brasil, especialmente no estado de Pernambuco. Nestes meses a precipitação diária foi cerca de duas vezes maior que a média anual da região como pode ser notado na Figura 86. Esta elevada precipitação dificultou o acesso ao topo das células e a montagem do acampamento, atrasando bastante o início da campanha.



Figura 85 – Fotos do topo da célula 08: (a) catadores na frente de operação; (b) espalhamento na adjacência com célula 04

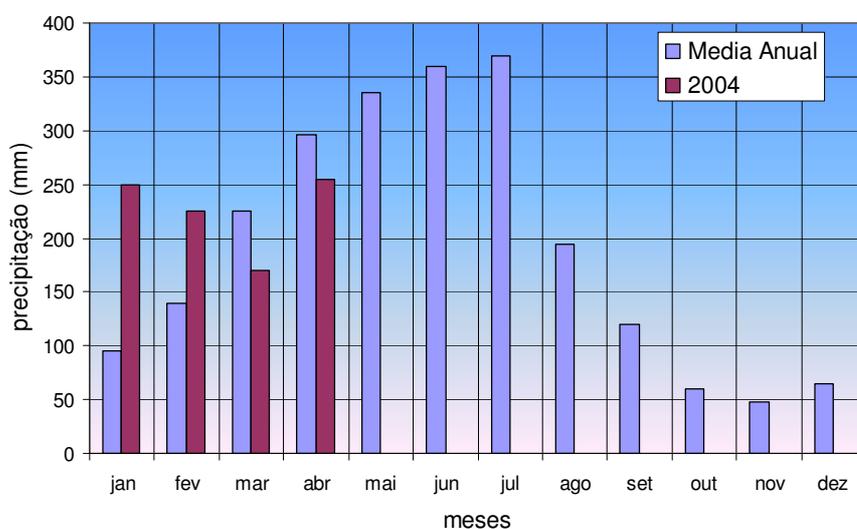


Figura 86 – Média histórica de precipitação na região do aterro da Muribeca (1971 – 2001) e precipitação nos primeiros meses de 2004 (Instituto Nacional de Meteorologia)

### 5.2.1. Célula 05

A Célula 05 foi escolhida para início das investigações considerando as adversidades referidas anteriormente. No período de chuvas intensas o acesso ao topo da C5 para instalação do acampamento e maquinário foi possível somente com auxílio de trator com esteira através da rampa mostrada na Figura 88. Segundo informações da administração do aterro, a disposição das camadas de lixo segundo a idade segue o esquema da Figura 87. Ainda, segundo a mesma fonte, no planalto esquerdo havia uma rampa de acesso antiga que havia sido preenchida com lixo recente (idade < 1 ano). A C5 possui um a piscina de chorume no seu topo com dimensões de 36m x 61m (Figura 88), que foi construída para receber o excesso de chorume produzido no aterro e permitir a

recirculação do lixiviado na célula. Na célula em questão foram executados 3 conjuntos de investigações com SPT, CPT e o PC-RSU e coletadas amostras deformadas para análise laboratorial conforme resultados apresentados posteriormente.

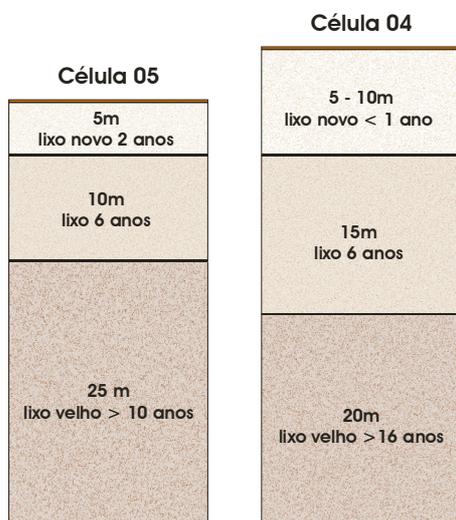


Figura 87 – Esquema da disposição das camadas de lixo nas células investigadas.

### 5.2.2. Célula 04

A célula C4 é mais alta que a célula C5 e não possuía camada de cobertura de solo no período em que foram realizados os ensaios. Além disto, segundo informações da administração do aterro, a disposição das camadas de lixo na célula segue o esquema apresentado anteriormente na Figura 87. O acesso à C4 somente foi possível na última semana de investigações após um período de estiagem fazendo uso um caminho de serviço preparado com aterro argiloso até o local experimental para permitir a instalação do acampamento e do maquinário. A C4 já foi bastante investigada por meio de sondagens e instrumentações (e.g. Monteiro, 2003; Melo, 2003; Paes, 2003), porém, devido aos alteamentos executados, os dados referem-se somente às camadas inferiores a 10m a partir da superfície. A zona superficial detém resíduo novo ainda não estudado. Nesta célula foi executado apenas um conjunto de investigações com SPT, CPT e PC-RSU e coletadas amostras deformadas para análise laboratorial conforme resultados apresentados posteriormente. A Figura 89 traz algumas fotos ilustrativas da célula C4.

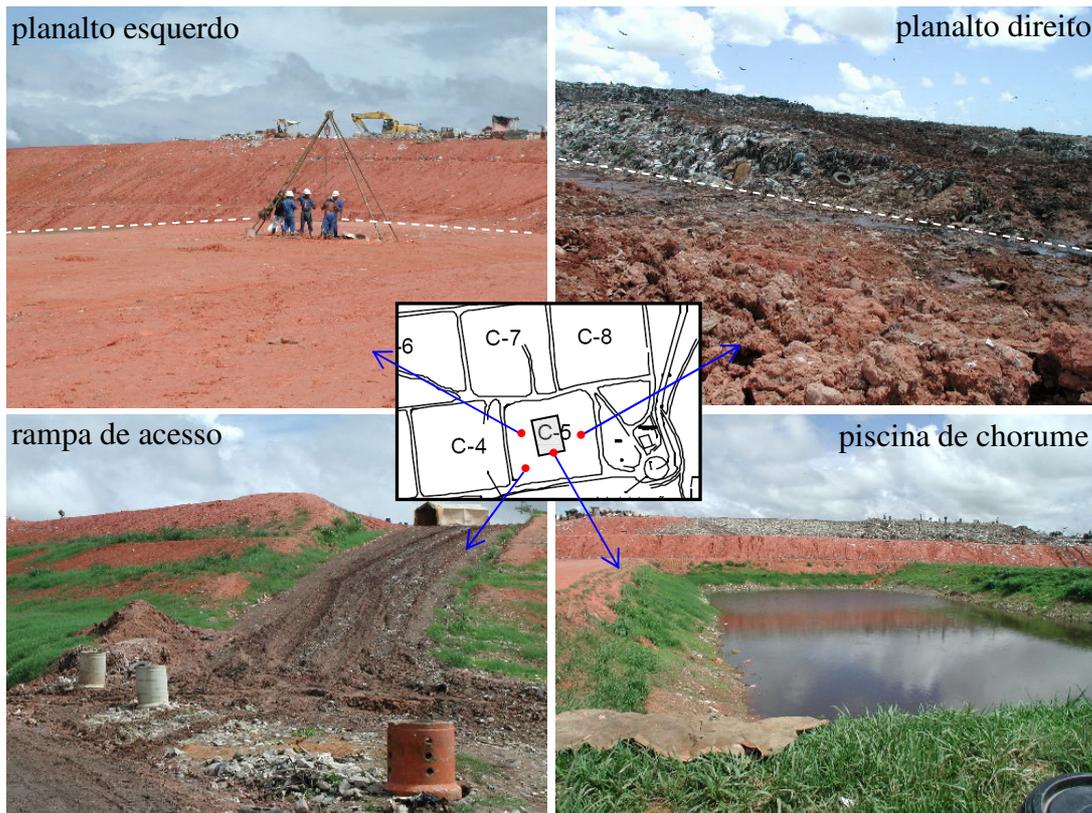


Figura 88 – Fotos da Célula 05 durante a campanha de ensaios.

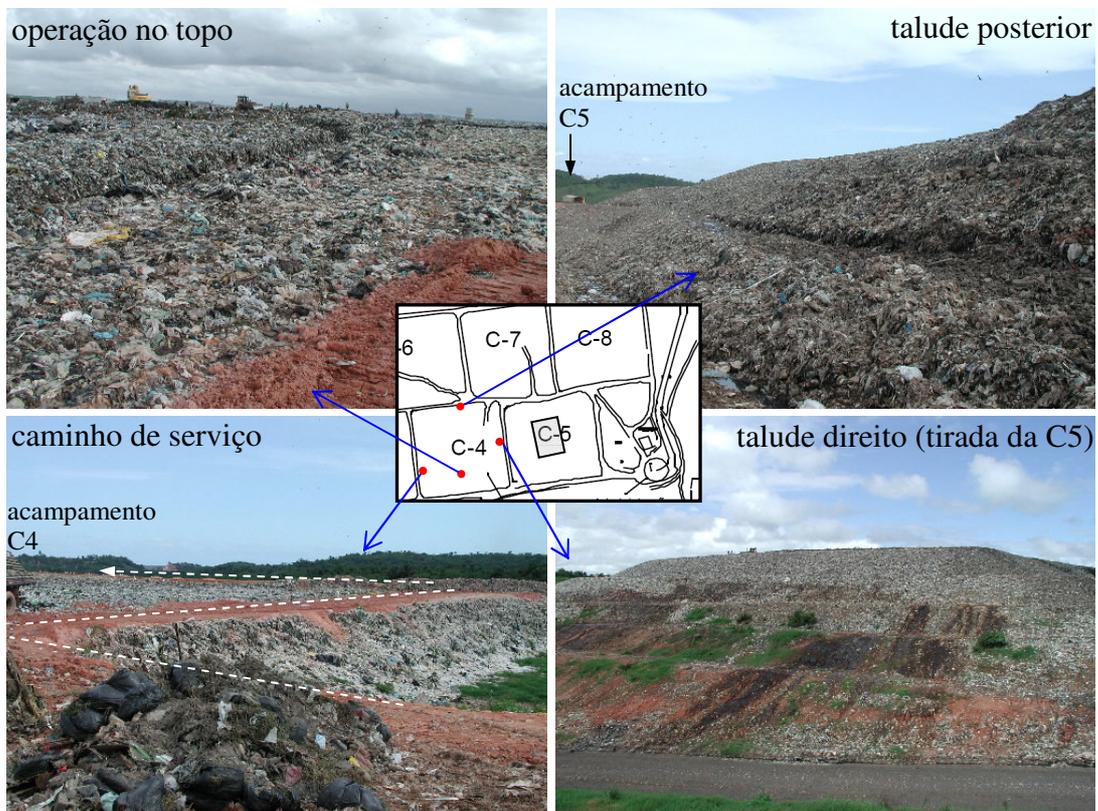


Figura 89 – Fotos da Célula 04 durante a campanha de ensaios.

### 5.3. Localção dos Pontos

Os pontos de investigação foram locados de acordo com a planta de localização apresentada na Figura 90.

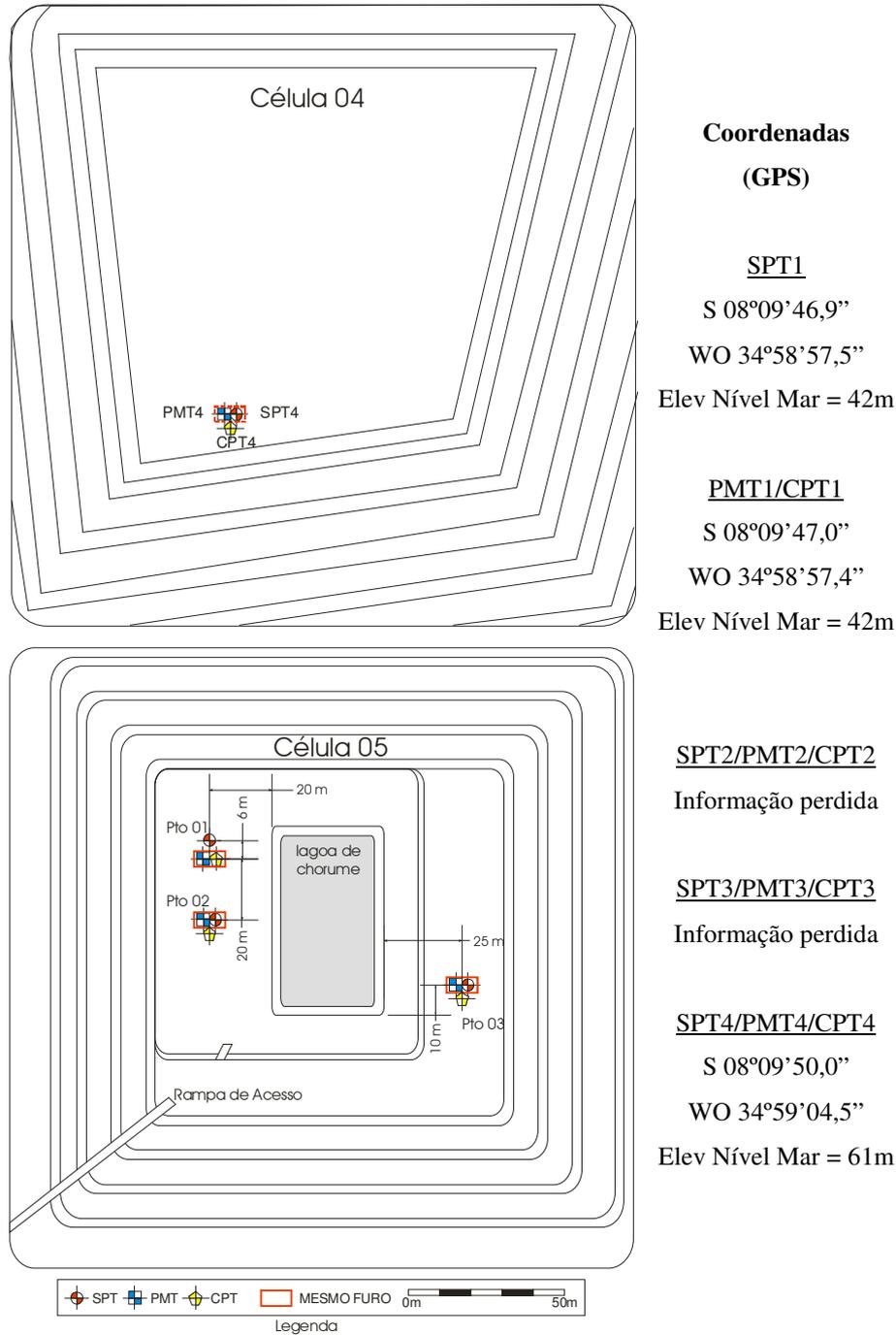


Figura 90 – Planta de locação dos pontos de investigação na Muribeca

#### **5.4. Equipe envolvida nas investigações**

A equipe envolvida na campanha de ensaios no aterro da Muribeca foi constituída por um engenheiro, quatro sondadores e um fiscal, responsáveis pelos ensaios de CPT, SPT e coleta de material para laboratório, e um engenheiro responsável pelas análises laboratoriais e pelo relatório final. Os serviços de SPT, CPT e laboratoriais foram contratados junto ao Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco (ITEP) e fiscalizados por este autor.

#### **5.5. Ensaio *In Situ* Realizados**

##### **5.5.1. Ensaio Pressiométricos**

###### **5.5.1.1. Metodologias de Instalação Empregas**

Foram testadas três metodologias de instalação da sonda pressiométrica nas células de resíduo: (i) cravação direta e contínua até a profundidade de ensaio, (ii) em pré-furo - em conjunto com SPT; (iii) em pré-furo - após SPT. Nos três casos empregou-se um sistema de cravação manual na instalação do pressiômetro (sem controle eficiente de velocidade) cuja foto está apresentada na Figura 91(a) e que tem sido originalmente utilizado pelo ITEP em ensaio de penetração do cone em aterros de RSU.

Para a utilização do sistema, a reação necessária para a cravação da sonda é proveniente de quatro trados que são fixados na camada superficial da célula (Figura 91(b,c,d)), geralmente constituída por uma parcela de solo e lixo. Após a instalação dos trados, o cravador é fixado por meio de porcas. Em seguida, pela rotação de uma manivela conectada a um sistema de catracas o operador movimentava verticalmente, de maneira ascendente ou descendente, a cabeça de cravação transferindo a energia às hastes. Com este movimento, o óleo hidráulico no interior de um êmbolo dentro da cabeça de cravação é pressurizado o que possibilita aferir a resistência à cravação com o auxílio de um manômetro conectado ao sistema.

Em algumas situações, que são abordadas a seguir, o sistema de cravação descrito foi empregado apenas como equipamento auxiliar no posicionamento do pressiômetro em profundidade, considerando que as reações à cravação eram mínimas devido a existência de um pré-furo.

### **Metodologia (i): Cravação Direta**

A metodologia convencional de instalação do tipo de pressiômetro desenvolvido nesta pesquisa é a cravação direta e contínua até a profundidade teste. Esta metodologia foi empregada somente no ensaio PMT1 aonde se chegou até a profundidade de 8m, realizando ensaios a cada 2m.

Durante a cravação do pressiômetro a variação de pressão no manômetro na superfície foi acompanhada e a reação total obtida sendo apresentada na Figura 92. Com as reações totais e considerando-se apenas a área da ponta do cone, que é de aproximadamente  $37,36\text{cm}^2$ , é possível calcular a reação de ponta necessária para a cravação que também está apresentada na Figura 92, onde se nota que as reações requeridas excederam oito toneladas em pontos próximos aos 4m e abaixo de 6m de profundidade.

Havia dúvidas sobre a eficiência do sistema de proteção com ponteira cônica de diâmetro 5% superior ao da membrana. Durante execução do ensaio PMT1 a partir da profundidade de 6m notou-se que as curvas *pressão x deslocamento* tinham comportamento pouco típico de ensaios pressiométricos. Também, foi sentido um acentuado odor na boca do furo sondagem possivelmente devido ao fluxo de gás oriundo de um furo na membrana. De fato, após a retirada da sonda do furo e inspeção visual constatou-se que esta se apresentava bastante danificada em vários pontos com pode ser notado através da Figura 93. A tentativa de inflar a membrana ao ar possibilitou a identificação de inúmeros locais de vazamento de gás.

Devido aos danos excessivos na membrana durante a cravação direta ficou claro que esta metodologia era inadequada para o local, influenciando diretamente na qualidade dos ensaios e causando perdas consideráveis de material. Acredita-se que a constituição do resíduo naquele ponto associada com possível desalinhamento do conjunto haste/sonda foram as causas preponderantes nos danos observados. Esta hipótese foi, em parte, comprovada posteriormente durante a instalação dos trados de reação nos demais pontos de ensaio de PMT,

quando foi necessário retirar uma parcela superficial do aterro + lixo para que os trados pudessem penetrar sem que a ponta helicoidal enrolasse demasiadamente no material plástico daquela camada. Na circunvizinhança dos pontos PMT1 e PMT2 observou-se uma quantidade acentuada de materiais cortantes e rígidos, em especial pedaços de vergalhão e vidro, que podem explicar o dano causado durante a cravação (Figura 94). Além disto, o mínimo desalinhamento das hastes implica em um contato ainda maior da membrana com o lixo, causando danos à membrana, o que endossa também a hipótese. A Figura 94 apresenta alguns materiais encontrados nesta camada superficial (prof < 2m) de instalação dos trados.



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.

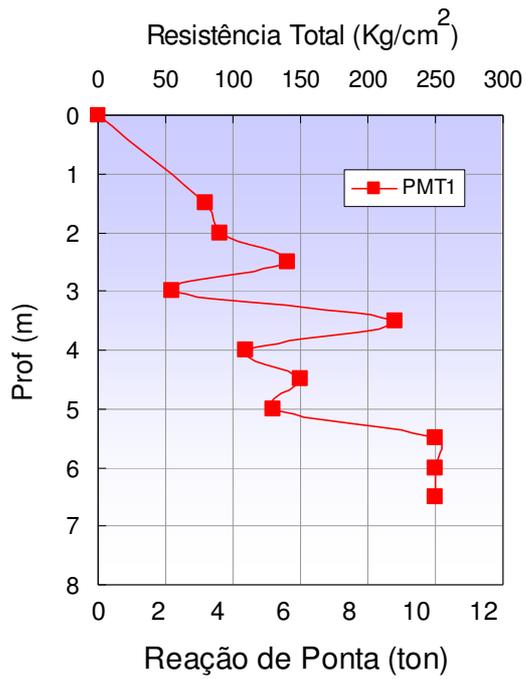


Figura 92 – Reação à cravação da sonda SP1 no furo PMT1.



Figura 93 – Detalhes da membrana danificada após cravação direta



Figura 94 – Resíduo da camada superficial célula 5: (a) retirada manual; (b) in natura; (c) vergalhão no furo; (d) materiais diversos

### Metodologia (ii): Cravação em conjunto com SPT

O fundamento desta metodologia foi fixar os trados de reação de tal forma a alinhar o cravador com o eixo do tripé do ensaio SPT (Figura 95). Assim, tinha-se um único furo para o SPT e o PMT. Então, realizava-se o SPT até cerca de 0,50m acima da profundidade teste e, em seguida, posicionava-se o cravador para então cravar o pressiómetro apenas o suficiente para que a zona de teste do equipamento atingisse a profundidade desejada. Procedendo desta maneira objetivava-se diminuir o efeito abrasivo na borracha durante a cravação e, conseqüentemente, preservar as membranas. O referido procedimento foi empregado no ensaio PMT2, em conjunto com o SPT2, até a profundidade de 4m quando houve perda da membrana e necessidade de troca de equipamento.

A metodologia (ii) mostrou-se melhor do que a anterior no quesito preservação da membrana à abrasão, porém foi bastante dispendiosa em termos de tempo, principalmente nos procedimentos de posicionamento e retirada do conjunto cravador e hastes. Além disto durante a execução de cada ensaio PMT

(cerca de 1h) a equipe ficou ociosa pois não tinha frente de trabalho. Portanto, entende-se que a metodologia (ii) tenha sido contra-producente.

Apesar da limitação, chegou-se até a cota de 4m quando, pouco antes do término do ensaio durante a etapa de descarregamento, a membrana rompeu de forma localizada na interface entre a camada de borracha e a de nylon, possivelmente configurando falha de fabricação, antecipando o encerrando da metodologia teste (ii).



Figura 95 – Trado do SPT alinhado com cravador do PMT/CPT

### **Metodologia (iii): Em pré-furo - após SPT completo**

Após os danos nas membranas montadas nas duas sondas durante as etapas anteriores, a colocação destas teve que ser feita em oficina com posterior calibração. Portanto, para otimizar a produção em campo deu-se continuidade à execução do SPT2 até a cota final pré-estabelecida, o que levou à concepção e uso da metodologia (iii) cujo fundamento foi adaptar o pressiómetro de cravação em um pré-furo completo de SPT.

Neste caso, considerando que as dimensões diametrais da sonda pressiométrica ( $d_{\text{ponteira}} = 58\text{mm}$ ;  $d_{\text{sonda}} = 54\text{mm}$ ) são superiores ao diâmetro do furo formado pelo amostrador padrão do SPT (50,8mm ou 2”) o ensaio não seria propriamente do tipo pré-furo, pois a sonda seria instalada de maneira justa caso o furo se mantivesse aberto, ou sob pressão de cravação inferior do que a condição

inicial caso este fechasse após sua formação. De uma forma ou de outra, a parede da sonda estaria em contato com a parede do furo ao início do ensaio de expansão.

O procedimento envolvido nesta metodologia pressupunha que a equipe de sondagem ia à frente e preparava o SPT alinhado com o cravador e em seguida realizava a sondagem a percussão completa, iniciando em seguida o ensaio pressiométrico, portanto, liberando o equipamento de SPT para instalação em outro furo. Após a execução do ensaio PMT podiam-se aproveitar, ainda, dois dos quatro trados já fixados rebatendo os outros dois para o lado oposto para fixação, isto é, ter-se-ia um furo único para SPT e PMT, e com o CPT em local bastante próximo.

Esta metodologia foi empregada em todos os outros pontos de ensaios pressiométricos com especial sucesso no PMT3 onde se empregou apenas uma membrana até a profundidade de 8m sem rupturas. No PMT4 houve apenas ruptura por fadiga do material da membrana (expansão excessiva) ou por efeitos térmicos do chorume e não por perfuração. Todavia, apesar desta melhora significativa no procedimento de instalação, ao final do segundo ensaio na profundidade de 4m no PMT2, pouco antes da etapa de descarregamento, a membrana foi furada claramente por material puntiforme (Figura 96) como, por exemplo, o caso do vergalhão mostrado anteriormente na Figura 94(c), estando esta preservada nas demais partes. Provavelmente, a perfuração se deu pelo fato da membrana estar naquele instante submetida a um nível elevado de deformação radial, induzindo perda na espessura de sua parede, com isto qualquer objeto puntiforme ou cortante seria capaz de perfurar a membrana.

#### **5.5.1.2. Procedimentos do Ensaio PMT**

As etapas seguidas antes e durante a execução do ensaio (Tabela 19) foram aqui classificadas da seguinte forma: montagem, instalação, ajuste e execução. A etapa de montagem (Figura 97) contemplou a preparação do equipamento de cravação, bem como, a conexão das partes acessórias do pressiômetro. Em seguida, a etapa de instalação (Figura 98) envolveu a metodologia empregada para levar a sonda até a profundidade teste, isto é, cravação direta ou em pré-furo. A etapa subsequente, de ajuste, foi fundamental para a execução perfeita dos ensaios

pressiométricos, pois foi nela que foram realizados os ajustes nas saídas iniciais de voltagem (*offset*) dos transdutores de deslocamento e de pressão, tanto manualmente na caixa eletrônica quanto na equação que alimenta o programa de aquisição de dados com o intuito de zerar os valores iniciais (i.e. zerar pressão para atmosfera). A etapa final (Figura 99) foi a de execução do ensaio em si compreendendo a aplicação dos acréscimos de pressão, ciclos de descarregamento e recarregamento e, então, o descarregamento final do ensaio. O deslocamento máximo permitido à membrana foi de aproximadamente 15mm a 18mm.



Figura 96 – Detalhe de perfuração da membrana ocorrida durante a expansão no PTM2

Tabela 19 – Resumo das etapas e procedimentos empregados nos ensaios PMT.

<b>Etapas</b>	<b>Procedimento</b>
Montagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalação do equipamento de cravação;</li> <li>• Passagem da mangueira pelas hastes de cravação e conexão com as extremidades da sonda e do SEG;</li> <li>• Conexão da fonte de pressão e do SEG à caixa de controle;</li> <li>• Conexão da fiação entre SEG, caixa de amplificação e computador;</li> <li>• Ligação da energia do sistema</li> </ul>
Instalação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cravação ou colocação da sonda na profundidade teste.</li> </ul>
Ajuste	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Na profundidade de ensaio aguardar 5 a 10min para estabilização térmica;</li> <li>• Ajuste manual (potenciômetros) na caixa eletrônica do offset dos canais dos HETs;</li> <li>• Conexão de engate rápido no SEG e abertura para a atmosfera da linha de pressão até a sonda;</li> <li>• Ajuste <i>offset</i> dos canais do transdutor de pressão e dos HET via software.</li> </ul>
Execução	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Início do ensaio com acréscimos de pressão de 20kPa, mantidos por 60s;</li> <li>• Após um dos HETs atingir cerca de 5mm a 6mm de deslocamento radial, proceder com descarregamento da ordem de 50 a 100kPa pela mesma trajetória;</li> <li>• Proceder com o re-carregamento até deslocamento radial próximo a 15mm;</li> <li>• Descarregar em estágios similares.</li> </ul>



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.

Durante os ensaios foi criado um arquivo no programa de aquisição de dados (*Picolog*), denominando o ponto ensaiado e sua profundidade, onde se monitoravam todos os sinais em forma de gráfico, planilha e saída de sinais com e sem conversão. A Figura 100 apresenta um exemplo ilustrativo das saídas gráficas durante um ensaio, onde é possível observar as etapas de acréscimo e decréscimo de carregamento, os deslocamentos em tempo real e a temperatura no interior da sonda.

### 5.5.1.3. Avaliação do Desempenho da Membrana

O desempenho do tipo de membrana de borracha nitrílica reforçada usada nas investigações realizadas não foi, de uma forma geral, satisfatório, pois a perda, seja pela cravação do aparelho ou pela expansão durante o ensaio, foi grande, totalizando cinco peças.



Figura 98 – Fotos da etapa de instalação do pressiômetro: (a) e (b) inserção da sonda; (c) colocação das hastes; (d) cravação do conjunto.

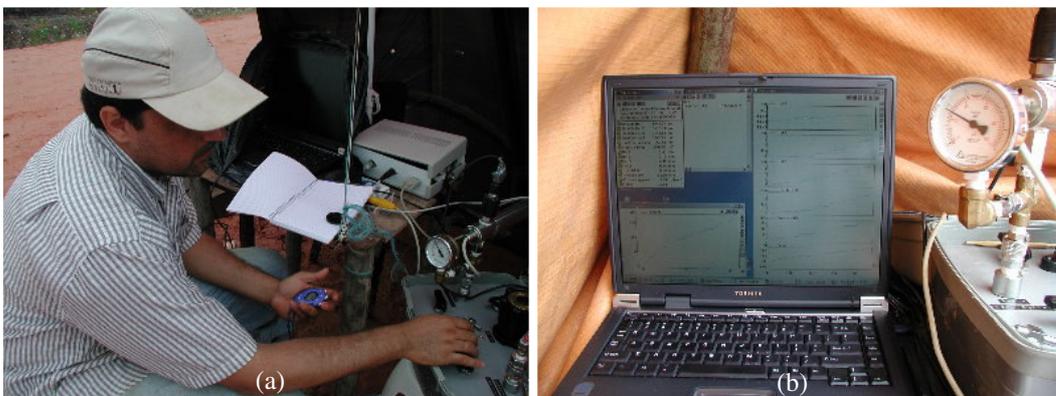


Figura 99 – Fotos da etapa de execução do ensaio: (a) aplicação dos acréscimos de pressão; (b) aquisição automática.

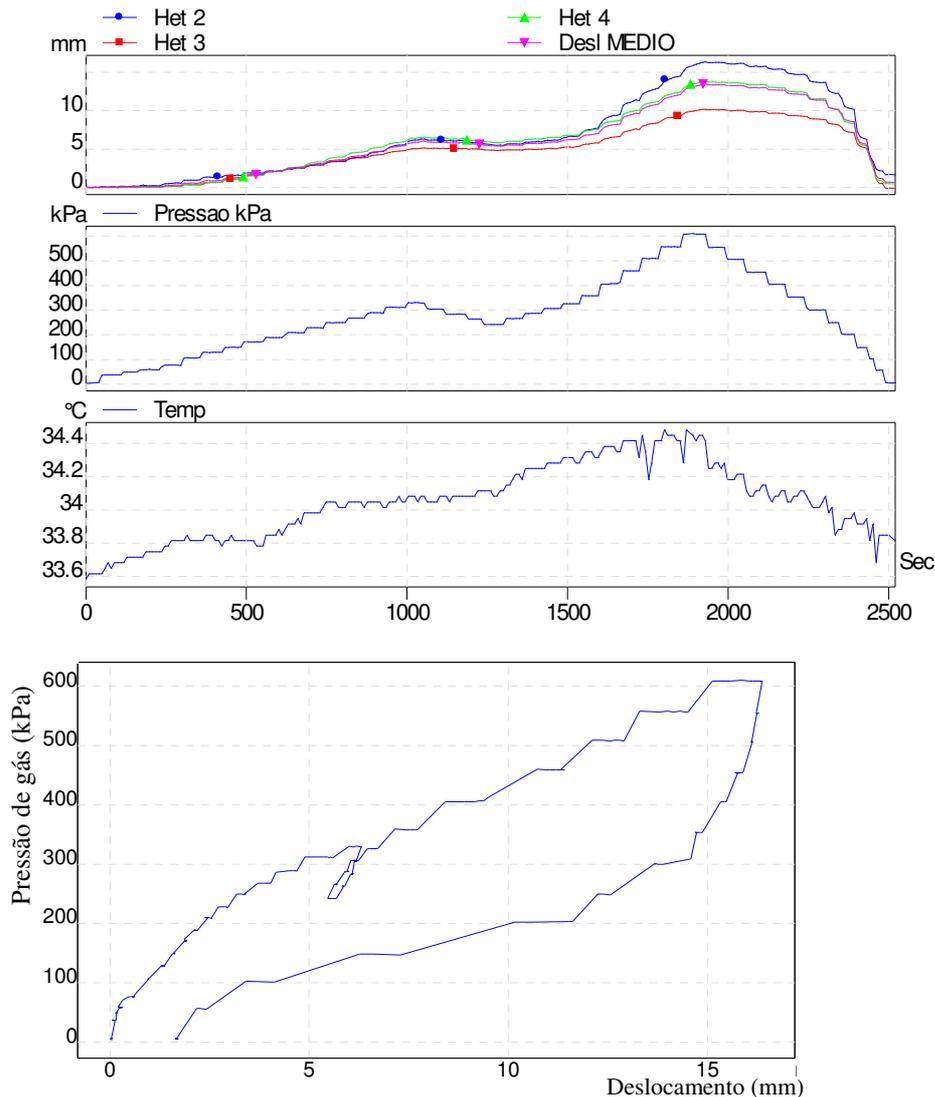


Figura 100 – Exemplo ilustrativo da saída gráfica durante um ensaio pressiométrico no aterro da Muribeca (PMT3 -6m)

As membranas sofreram bastante dano devido à abrasão durante a cravação direta da sonda, conforme abordado anteriormente e observado na Figura 93. Em contrapartida, durante a instalação em pré-furo de SPT a membrana funcionou melhor neste quesito e o reforço de nylon, apesar de submetido a danos superficiais (Figura 101(a)), resistiu bem, como foi o caso particular do furo PMT3 onde não houve ruptura até a profundidade final do ensaio (8m).

Acredita-se que na maioria dos casos a membrana não suportou as expansões impostas durante o ensaio, possivelmente ocorrendo ruptura na interface entre os dois materiais constituintes da membrana (fibras de nylon e borracha) devido à incompatibilidade elástica entre eles, como é o caso ilustrado

pela foto da Figura 101b onde se tenta expandir uma membrana após ruptura localizada (esgarçamento) de uma determinada área. Em outros casos, o dano deu-se devido a objetos puntiformes que perfuram a membrana expandida, como foi o caso apresentado na Figura 96 anteriormente.

Possivelmente, o efeito térmico no interior das células associado à expansão elevada da membrana teve influencia direta no desempenho desta.



Figura 101 – Fotos de danos à membrana: (a) dano superficial na camada de reforço; (b) membrana com ruptura localizada.

## 5.5.2. Sondagens à Percussão em RSU (SPT)

### 5.5.2.1. Metodologia de Execução

Foram executadas quatro sondagens do tipo SPT em células do aterro da Muribeca, três na C5 e uma na C4, segundo locação dos pontos apresentados na Figura 90, até a profundidade de 15m, com o objetivo de verificar a estratigráfica, retirar amostras para análises de sólidos voláteis e umidade, obter o valor de  $N_{spt}$  e fornecer pré-furo para os ensaios com o pressiômetro.

Ensaio de penetração dinâmica do tipo SPT em solos são normalizados pelas NBR-8036 (Normas Gerais de Sondagem de Reconhecimento para Fundações de Edifícios), NBR-6484 (Método de Execução de Sondagem) e NBR-6502 (Terminologia de Rochas e Solos) da ABNT. Todavia, de acordo com Juca *et al.* (2000) para sondagens em ADRSU a metodologia padrão de investigação tem que ser adaptada para o contexto, devendo ser contínua, sem lavagem por água ou bentonita para preservar a umidade natural do resíduo e com auxílio de revestimento de 6,35cm de diâmetro interno no trecho inicial. Emprega-se o tripé convencional com peso padronizado e levantamento manual para o avanço contínuo do amostrador bipartido padrão do SPT de 3,40cm de diâmetro interno, 5,08cm de diâmetro externo e 78cm de comprimento total.

A Figura 102 apresenta o conjunto montado durante a execução do ensaio onde, similar a SPT em solos, nas profundidades de amostragem retirava-se o amostrador bipartido para inspeção visual e coleta de amostras de lixo para os ensaios de caracterização, sólidos voláteis e umidade (Figura 103), sendo acondicionadas em sacos plásticos e colocadas em caixas de isopor. Ressalta-se que em alguns casos, principalmente em zonas muito úmidas, a recuperação de material foi bastante pequena.



Figura 102 – Equipe realizando ensaio de SPT em RSU.



Figura 103 – Amostragem durante ensaios SPT em RSU: (a) amostrador padrão; (b) abertura do amostrador; (c) material bem recuperado; (d) parcela da amostra representativa.

### 5.5.2.2. Representatividade dos Ensaios SPT em RSU

O ensaio SPT tem sido prática comum em investigações em aterros de RSU por ser relativamente de baixo custo, por fornecer informações sobre a estratigrafia do aterro e por possibilitar amostragens deformadas em pequena escala em diversas profundidades. Entretanto, a perfeita penetração do amostrador está muitas vezes condicionada a ocorrência de obstáculos de grande rigidez como latas, madeiras, pneus e entulhos ou ainda por camadas de materiais plásticos difíceis de corte pela ponteira do amostrador. Este quadro faz com que o  $N_{spt}$  obtido das sondagens seja, de certa forma, apenas um indicativo do ganho de resistência à penetração do meio quando se dispõe de vários resultados.

Na campanha com SPT realizada no aterro da Muribeca cabe ressaltar casos onde, durante a cravação, houve bloqueio da ponteira do amostrador pela ocorrência de material plástico em excesso (Figura 104) e onde um pedaço de madeira ficou fortemente preso na ponteira. Em ambos os casos praticamente não

houve recuperação de material, pois simplesmente não foi possível para o resíduo adentrar no amostrador. Nestes casos certamente o  $N_{spt}$  determinado não foi a real representação da resistência à penetração e sim a resistência ao arrasto. Este cenário pode demonstrar a subjetividade deste índice em investigações com RSU.



Figura 104 – Entupimento da ponteira com plástico durante ensaio SPT com pouca recuperação de material.

### 5.5.3. Sondagens de Penetração Estática em RSU (CPT)

#### 5.5.3.1. Metodologia de Execução

Foram executadas quatro sondagens do tipo CPT mecânico, sendo 03 na célula C5 e somente 01 na célula C4, segundo locação dos pontos apresentados na Figura 93 em profundidades de até 15m, de acordo com o que preconiza a NBR-12069 (1991) – Ensaio de penetração de cone *in situ* (CPT).

O sistema de cravação foi o mesmo empregado na instalação do PMT descrito anteriormente. A partir do CPT2 foram aproveitados dois dos quatro trados de reação já instalados no ensaio PMT e rebatidos e instalados os outros dois para o lado oposto, de tal forma que os CPTs foram realizados adjacentes aos PMTs. Este procedimento reduziu significativamente o tempo dedicado à instalação do cravador e, conseqüentemente, o ensaio como um todo, pois a etapa que demandava maior tempo era justamente a instalação dos trados de reações.

Além disto, a localização do CPT possibilitava o ensaio em material com características similares àqueles ensaiados com o PMT e o SPT.

Nos ensaios empregou-se um cone mecânico com luva de atrito (Begemann, 1963) e hastes de 1m, marcadas de 20cm em 20cm. O conjunto era cravado e as leituras totais, em profundidades determinadas, eram tomadas com um manômetro na superfície. Em seguida, por meio de hastes internas, somente a ponteira era cravada obtendo-se a leitura da resistência de ponta ( $q_c$ ). Finalmente, a diferença entre a resistência de ponta e a total forneceu a resistência de atrito da luva, denominada resistência de atrito lateral ( $f_s$ ).

#### **5.5.4. Análises Laboratoriais**

As análises laboratoriais envolveram a determinação do teor de umidade e de sólidos voláteis dos resíduos coletados nas células C5 e C4 sendo estas realizadas pelo Instituto Tecnológico de Pernambuco (ITEP) com metodologia similar descrita por Monteiro (2003). O procedimento de amostragem seguiu a NBR 10007 – Amostragem de Resíduos Sólidos.

As amostras empregadas nas análises em laboratório, provenientes dos furos de sondagem SPT e obtidas em diferentes profundidades com auxílio do amostrador bipartido padrão, foram acondicionadas em sacos plásticos de polietileno e protegidas em caixas térmicas no campo e em seguida levadas ao laboratório onde foram mantidas a 4°C.

##### **5.5.4.1. Ensaio de Teor de Umidade ( $\%w_r$ )**

Empregou-se a norma NBR 6457 – Preparação para Ensaio de Caracterização, nos ensaios realizados. Estes consistiram inicialmente em pesar parcelas representativas das amostras de resíduo obtidas, com umidade natural, em cápsulas metálicas descontando as taras destas e, em seguida, levar o conjunto à estufa com temperatura média de 105°C por 24h. Monteiro (2003) reporta que esta temperatura depende da consistência e massa da amostra e justifica a possibilidade do emprego de temperatura superior a padrão de 65°C. Após o processo de secagem em estufa, as amostras foram resfriadas em um dessecador

na temperatura ambiente para evitar alterações no peso e, posteriormente, cápsula e amostra foram pesadas em balanças analíticas. Finalmente, o teor percentual de umidade do resíduo ( $\%w_r$ ) foi obtido segundo a Equação 39, sendo calculado em função do peso úmido.

$$\%w_r = \frac{\textit{peso inicial} - \textit{peso final}}{\textit{peso inicial}} \cdot 100\% \quad \dots(39)$$

#### 5.5.4.2. Ensaio de Teor de Sólidos Voláteis (%SV)

O teor de sólidos voláteis foi determinado segundo WHO (1979), e o procedimento consistiu inicialmente em acondicionar parcelas representativas das amostras retiradas de resíduo em cadinhos de porcelana, cujos pesos da amostra e da tara foram devidamente obtidos, e colocá-los em estufa para secagem na temperatura entre 60°C e 65°C. Em seguida, o conjunto foi levado até uma mufla onde a temperatura foi elevada até 550°C durante um mínimo de 2h. Logo após, a amostra foi resfriada em dessecador e pesada em balança analítica para determinar o peso seco do material restante. O teor de sólidos voláteis (%SV) foi obtido em porcentagem segundo a Equação 40, a seguir.

$$\%SV = \frac{\textit{peso inicial} - \textit{peso final}}{\textit{peso inicial}} \cdot 100\% \quad \dots(40)$$

### 5.6. Apresentação de Resultados

#### 5.6.1. Resultados de Campo - PMT

Os dados brutos de campo, isto é, sem qualquer tratamento ou correção, estão apresentados nas Figuras 105 a 108 sob a forma de curvas *pressão de gás x deslocamento radial*, onde o deslocamento radial refere-se ao movimento de abertura ou fechamento dos braços móveis, referidos como Het, quando da expansão ou retração da membrana, e a pressão de gás é a pressão efetivamente aplicada no interior da sonda, medida pelo transdutor de pressão localizado no

SEG, ainda sem o desconto da rigidez da membrana. Cada gráfico refere-se ao ensaio realizado para uma dada profundidade e mostra os valores por braços quando disponíveis, pois em alguns casos um ou outro Het apresentou algum defeito sendo este suprimido nos gráficos.

O objetivo de apresentar as curvas brutas dos ensaios e simplesmente mostrar o comportamento real observado destas em campo para que seja possível inferir o nível de pressões necessário para realizar o ensaio do material em questão, considerando a rigidez da membrana e do resíduo, e possibilitar avaliar a tendência de evolução durante o ensaio.

As curvas com as devidas correções e traçadas em unidades de deformação da cavidade, comum em ensaios pressiométricos, serão apresentadas em itens posteriores, quando serão realizadas as interpretações dos ensaios.

### **5.6.2.**

#### **Resultados de Campo - SPT**

As variações dos valores de  $N_{spt}$  com a profundidade nas células C5 e C4 estão traçadas na Figura 109, enquanto que os laudos de sondagem descrevendo o perfil estratigráfico encontrado em profundidade constam nos anexos desta Tese.

A interpretação dos resultados dos ensaios SPT, bem como as correlações com as demais informações da campanha, serão apresentadas em item posterior desta pesquisa.

### **5.6.3.**

#### **Resultados de Campo - CPT**

Nas Figuras 110 (célula C5) e 111 (célula C4) estão traçados, em função da profundidade teste, os gráficos de resistência de ponta ( $q_c$ ) e de atrito lateral ( $f_c$ ) obtidos nos pontos de sondagem. A profundidade máxima de ensaio foi 15m.

Análises interpretativas e correlações com os demais ensaios realizados serão abordadas em item posterior desta pesquisa.

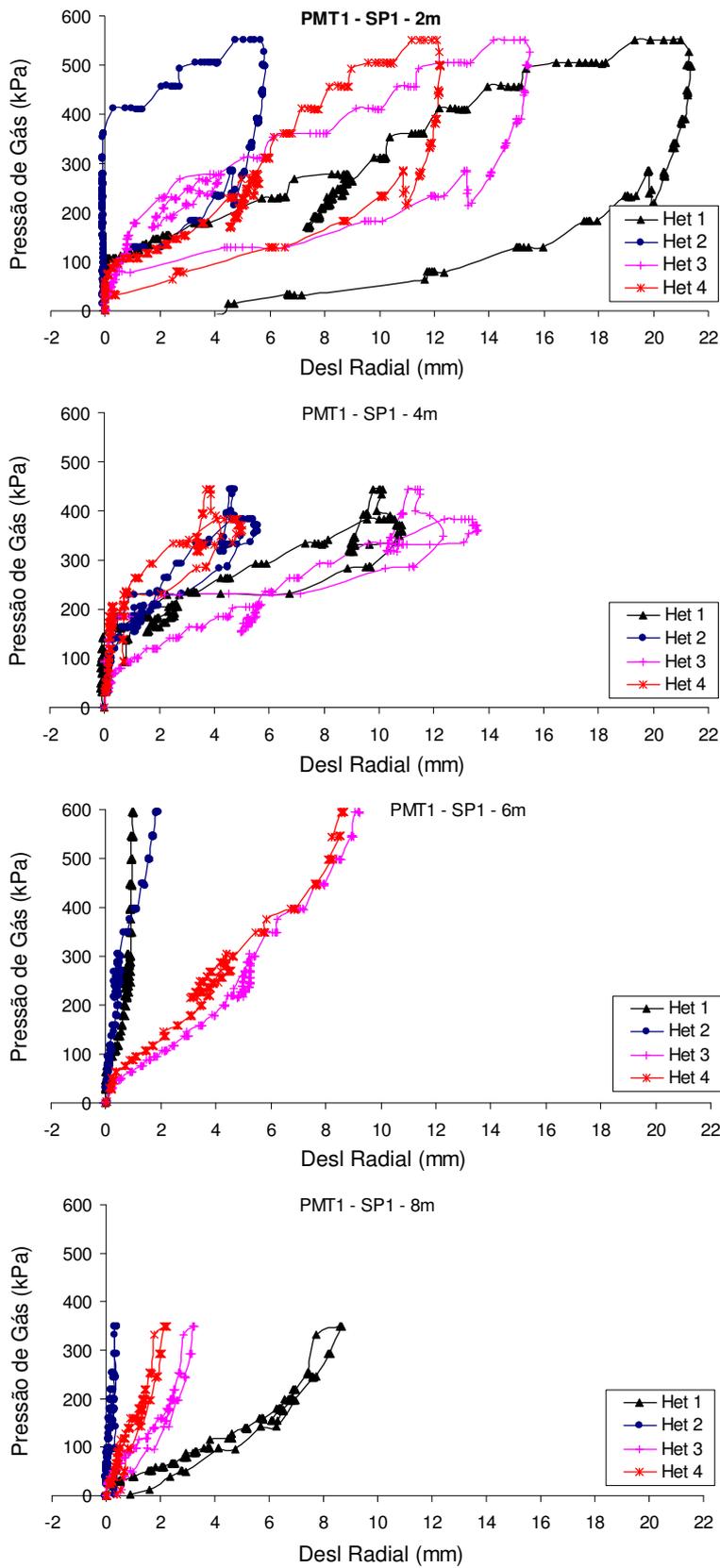


Figura 105 – Curvas pressão x deslocamento PMT1– **dados brutos**, sem correção da rigidez da membrana.

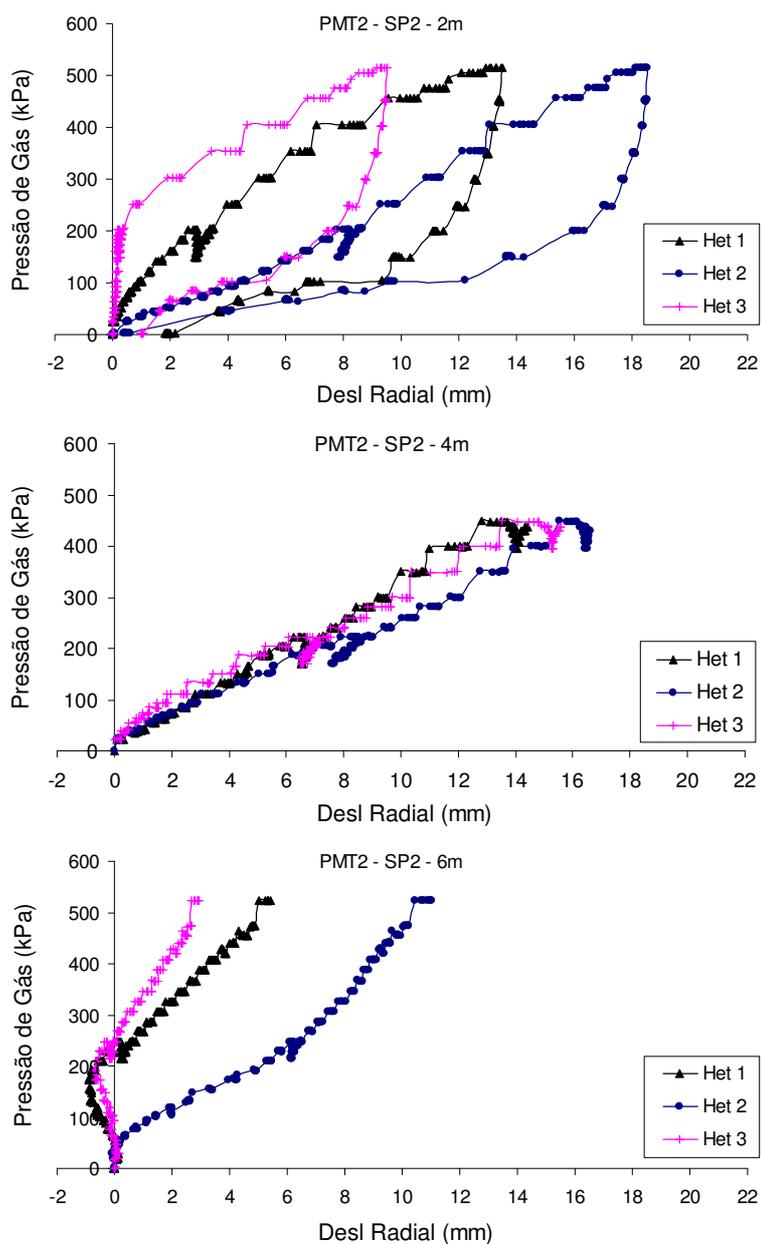


Figura 106 – Curvas pressão x deslocamento PMT2– **dados brutos**, sem correção da rigidez da membrana.

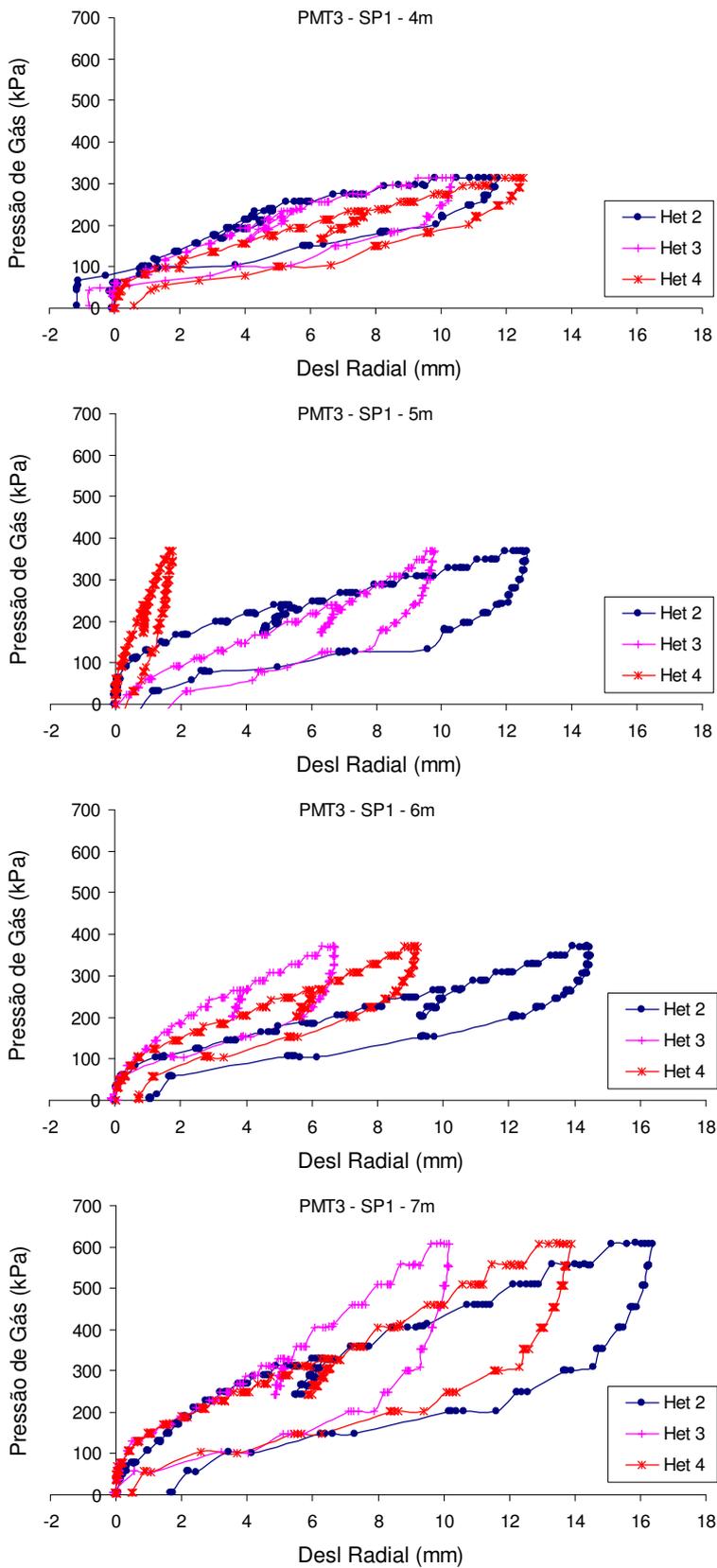


Figura 107 – Curvas pressão x deslocamento PMT3– **dados brutos**, sem correção da rigidez da membrana

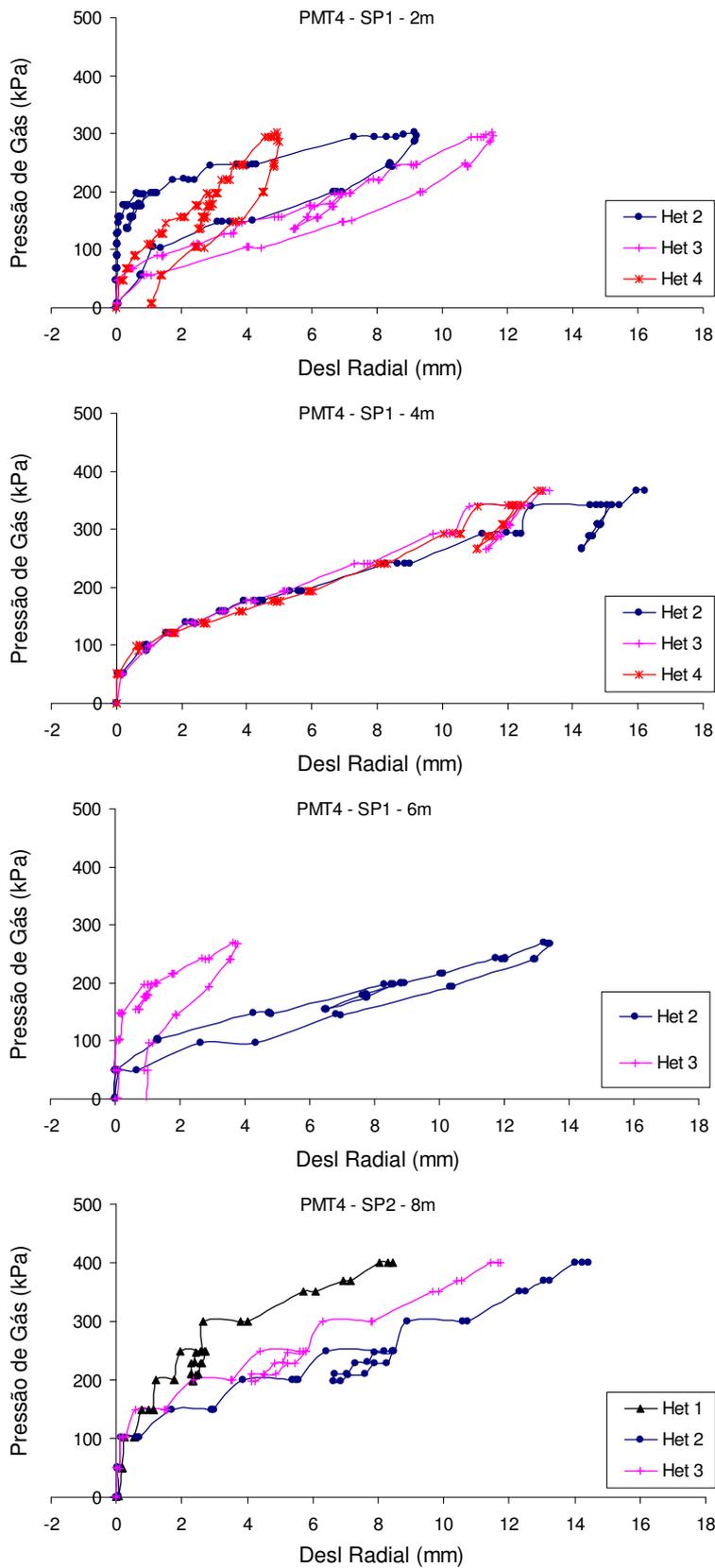


Figura 108 – Curvas pressão x deslocamento PMT4– **dados brutos**, sem correção da rigidez da membrana

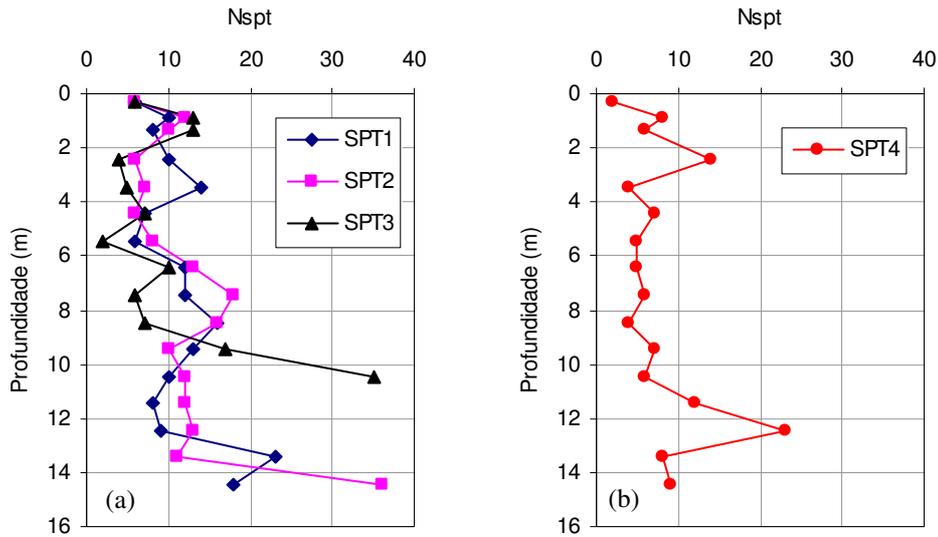


Figura 109 – Resultados de ensaios SPT: (a) Célula 05; (b) Célula 04

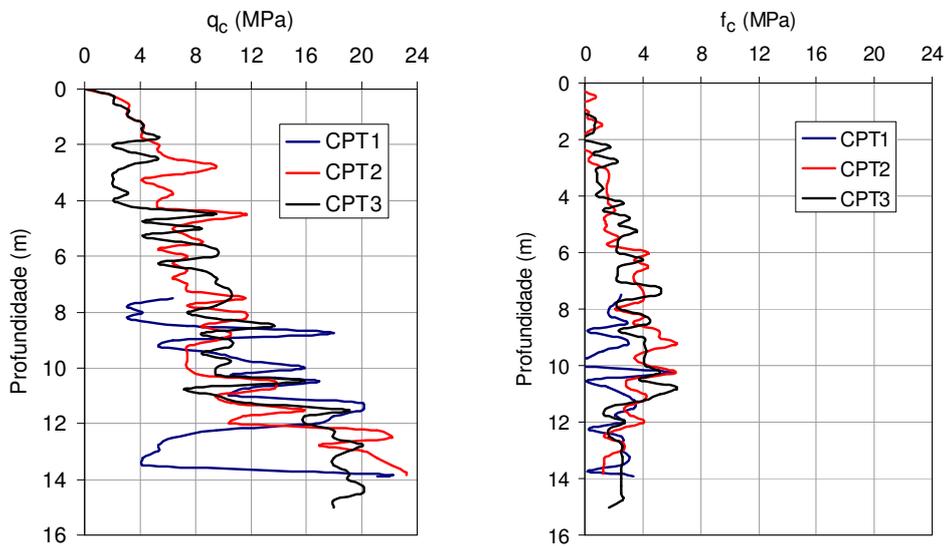


Figura 110 – Variação de  $q_c$  e  $f_s$  na célula C5.

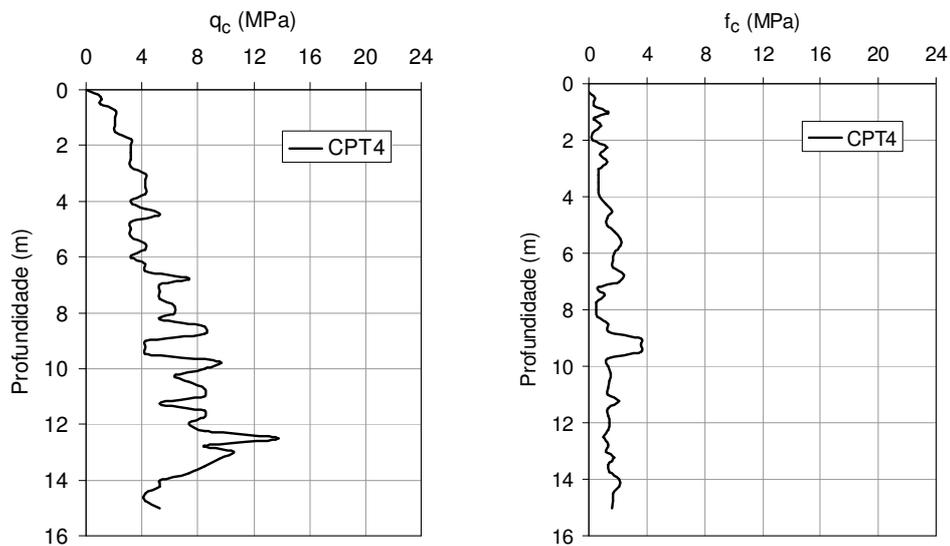


Figura 111 – Variação de  $q_c$  e  $f_s$  na Célula 04.

**5.6.4. Resultados de Laboratório – umidade e sólidos voláteis**

As variações percentuais em profundidade do teor de umidade e de sólidos voláteis nas células C5 e C4 estão descritas nas Figuras 112 e 113, respectivamente.

Análises interpretativas e correlações com os demais ensaios realizados serão abordadas em item posterior desta pesquisa.

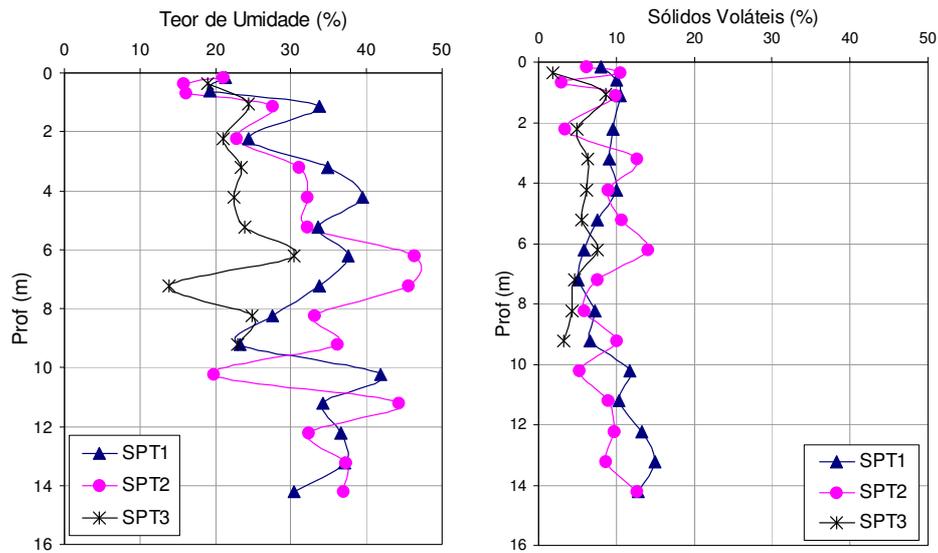


Figura 112 – Variação de teor de umidade e sólidos voláteis na célula C5.

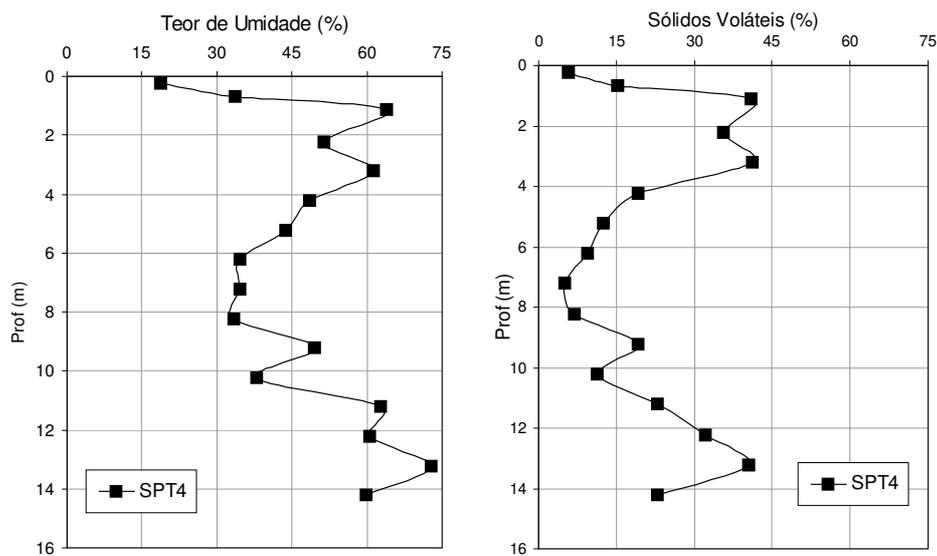


Figura 113 – Variação de teor de umidade e sólidos voláteis na célula C4.

## 6 Análise e Interpretação dos Resultados

### 6.1. Introdução

Foram executados ensaios do tipo SPT, CPT e PMT em duas células do aterro controlado de resíduos sólidos da Muribeca, conforme descrito no Capítulo 5. A análise e interpretação dos resultados obtidos é certamente uma fase bastante controversa desta pesquisa, pois envolve a adaptação e emprego de metodologias originalmente concebidas para solos. Sabe-se que atualmente não há metodologias específicas para interpretação destes ensaios particularmente para RSU. Muitas vezes, por meio destas adaptações, têm-se apenas análises qualitativas, em outras, têm-se correlações entre os parâmetros das diversas técnicas visando à busca de padrões que possam descrever o comportamento dos resíduos e produzir metodologias de análise. Entretanto, devido à variabilidade nos resultados dos parâmetros normalmente encontrados, este tipo de associação é difícil.

A questão inicial aqui é “Qual metodologia de interpretação de ensaios *in situ* se adapta melhor para o contexto de RSU?”. No caso de ensaios com o cone e o pressiômetro, as metodologias de interpretação disponíveis na literatura distinguem-se para materiais coesivos e para friccionais, ou seja, foram desenvolvidas para areias ou para argilas. Há ainda possibilidade de interpretação de ensaios em meios não saturados, porém falar-se em determinação de sucção em lixo não parece ser muito coerente. Sabe-se, ainda, que o RSU pode ser modelado como um material constituído de duas parcelas: uma matriz básica, com partículas finas, e outra matriz de reforço, constituída de plásticos, têxteis, madeira, borracha, etc... (Jessberger *et al.*, 1995). A matriz básica é responsável pela parcela de resistência por atrito, enquanto que a matriz de reforço confere o aspecto coesivo ao material (e.g. Kölsch, 1995; Jessberger *et al.*, 1995; Manassero *et al.*, 1996; Mahler & Lamare Neto, 2000; Fucale, 2000). Para níveis de deformação elevados a resistência coesiva é bastante mobilizada por conta da

matriz de reforço. Para deformações menores a resistência é governada pelo atrito interno.

Empregou-se o ábaco proposto por Schmertmann (1978) para tentar situar o resíduo investigado dentro de uma classificação convencional da Mecânica dos Solos de tal forma que se possa ter mais segurança sobre qual metodologia de interpretação utilizar. Nele os dados de resistência de ponta ( $q_c$ ) e razão de atrito ( $R_a=f_s/q_c$ ) dos ensaios CPT são traçados para avaliação qualitativa da classificação. Similar procedimento já foi adotado por outros autores em investigações com RSU (e.g. Carvalho, 1999; Oliveira, 2002) apresentando resultados consistentes entre si.

Ao analisar os resultados dos CPTs apresentados anteriormente nas Figuras 110 e 111 percebe-se que há significativa variação na resistência de ponta com a profundidade nos três primeiros ensaios. Sendo assim, traçar diretamente estes pontos no ábaco implicaria em uma nuvem com distribuição muito grande, tornando inconclusiva qualquer análise. Por outro lado, selecionar apenas os valores médios de cada CPT para emprego no referido ábaco certamente não seria representativo da heterogeneidade do meio. Então, a opção intermediária escolhida entre estes dois extremos foi avaliar a distribuição de classes de valores de  $q_c$  e  $R_a$  por meio dos histogramas de variação (Figura 114 e 115), onde foram agrupados todos os resultados das sondagens CPT nas duas células investigadas, excluindo-se os pontos de picos extremos que representam apenas resistências pontuais de materiais mais sólidos e os valores nulos da superfície. Com isto, foi possível determinar de maneira aproximada o limite inferior e o superior de cada distribuição por meio da inspeção visual dos histogramas, fornecendo os limites de 3MPa a 11MPa para  $q_c$  e 2% a 4% para  $R$ .

Conduto, dada a subjetividade da análise realizada acima, outra avaliação estatística foi conduzida. Determinou-se a média aritmética geral para a variação de  $q_c$  e  $R_a$ . Em seguida, calculou-se o desvio padrão do espaço amostral de  $q_c$  e  $R_a$ . Então, os valores medianos foram somados e subtraídos do desvio padrão, fornecendo os seguintes novos limites: 3MPa a 13MPa e 1% e 5% para  $q_c$  e  $R_a$ , respectivamente.

Os resultados máximos e mínimos determinados, bem como os valores médios de cada ensaio, foram traçados no ábaco de Schmertmann produzindo o resultado ilustrado na Figura 116.

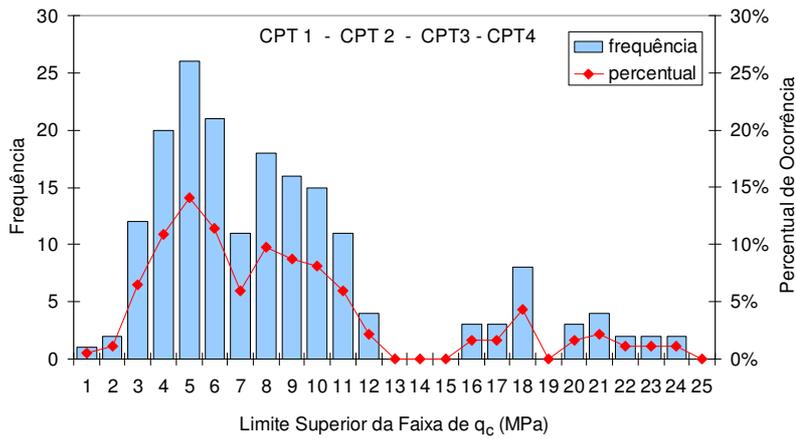


Figura 114 – Histograma de distribuição de  $q_c$  nas células C4 e C5.

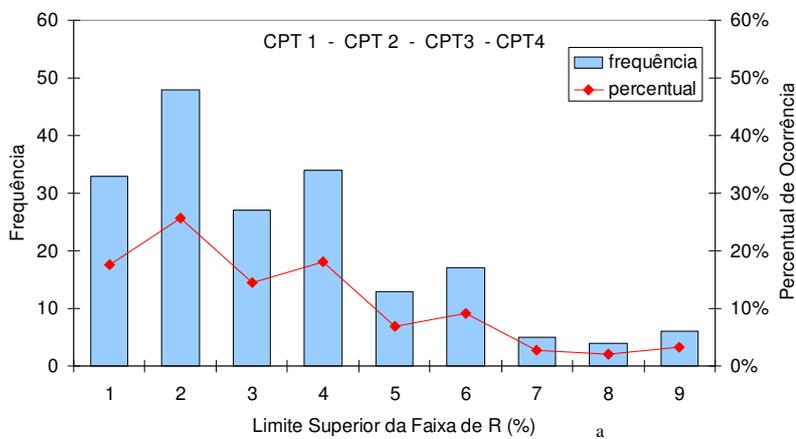


Figura 115 Histograma de distribuição de  $R_a$  nas células C4 e C5.

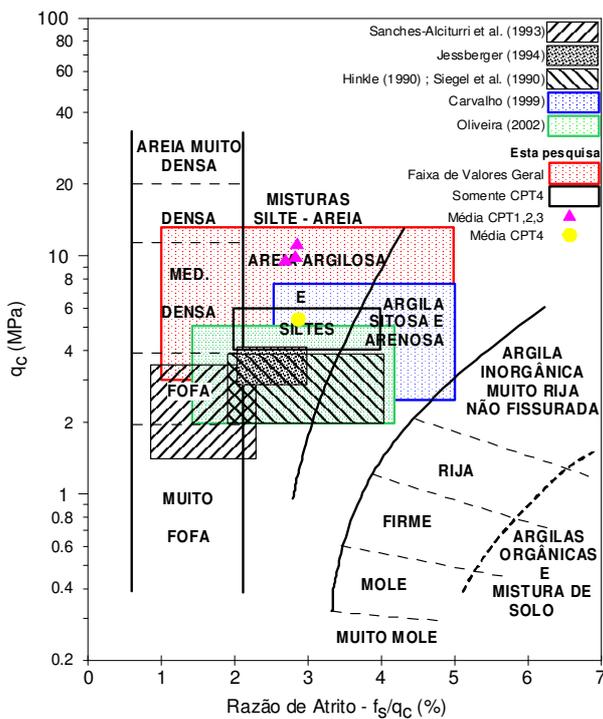


Figura 116 – Classificação do RSU do aterro da Muribeca com ábaco de Schmertmann (1978)

Por intermédio das duas avaliações conduzidas foi possível reduzir a nuvem de pontos de resultados de campo, porém a variabilidade ainda foi grande, situando o RSU investigado como um material que vai desde uma areia mediamente densa, passando por uma areia argilo-siltosa, até uma argila silto-arenosa. Acredita-se que, dada a variabilidade observada, poder-se-ia justificar o emprego de metodologias de interpretações usadas tanto para areias quanto para argilas na interpretação dos ensaios PMT.

## **6.2. Ensaio Pressiométrico**

### **6.2.1. Correção das Curvas Pressiométricas**

O procedimento nesta etapa envolveu a correção das curvas pressiométricas brutas apresentadas nas Figuras 105 a 108 considerando a rigidez da membrana durante expansão ao ar obtida anteriormente em laboratório, e levado em conta a redução de espessura destas durante o ensaio segundo metodologia apresentada por Clarke (1995) e descrita anteriormente no item 4.6.5.2. Além disto, o eixo das abscissas foi devidamente transformado para a representação convencional em ensaios deste gênero que é feita em termos da deformação da cavidade ( $\epsilon_c$ ) definida anteriormente na Equação 04. Com isto, as novas curvas obtidas foram rerepresentadas nas Figuras 117 a 131 de maneira individual para cada Het quando disponível (identificadas com as letras *a*, *b*, *c* ou *d*) e como a média aritmética dos Hets (identificadas com a letra *e*), representando a expansão de uma cavidade única. Além disto, nos gráficos das referidas figuras estão traçados apenas os pontos ao final do intervalo de tempo (60s) após cada acréscimo ou decréscimo de pressão e somente o trecho onde não houve ruptura da membrana.

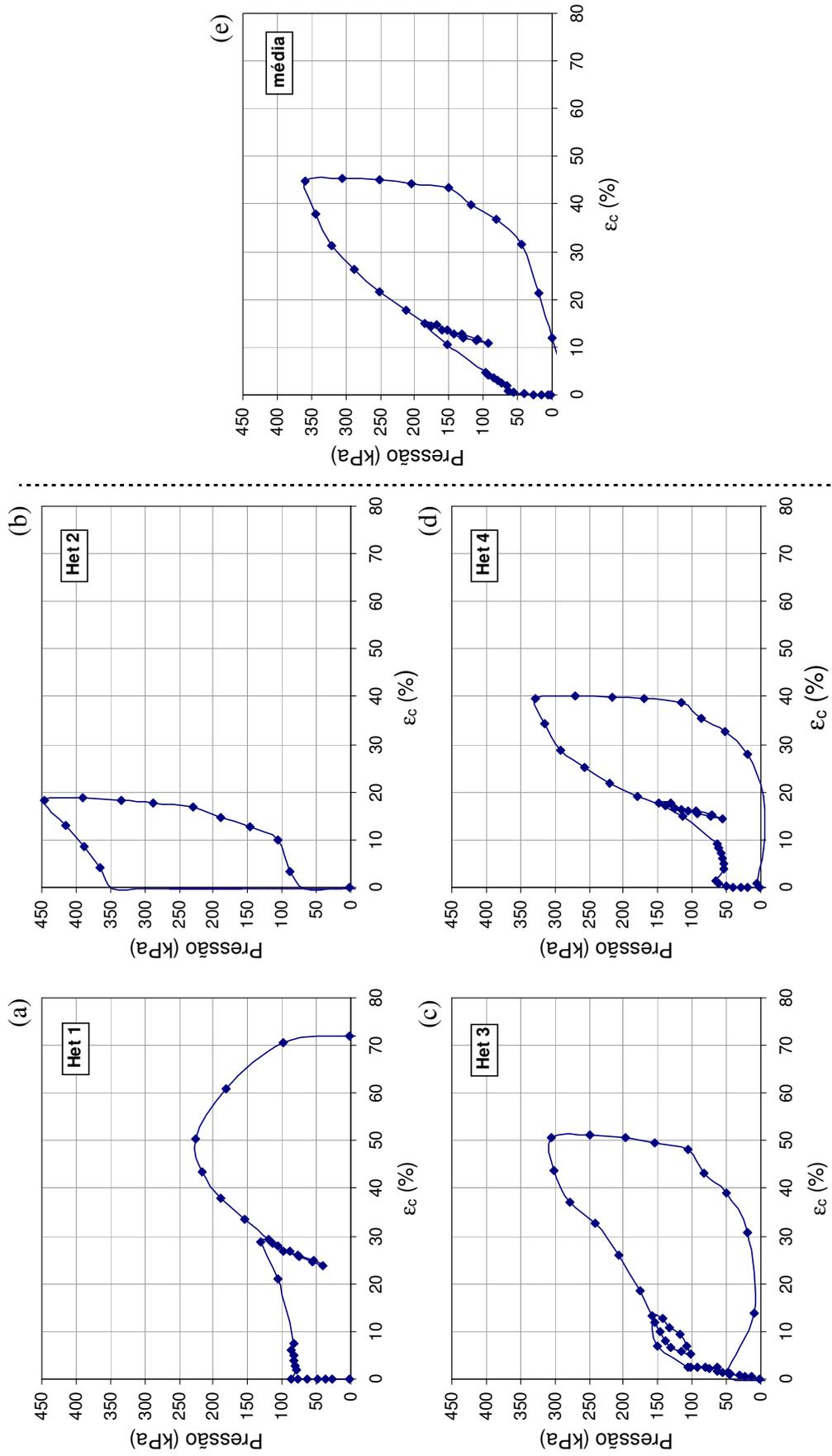


Figura 117 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT1 – 2m – SPI: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

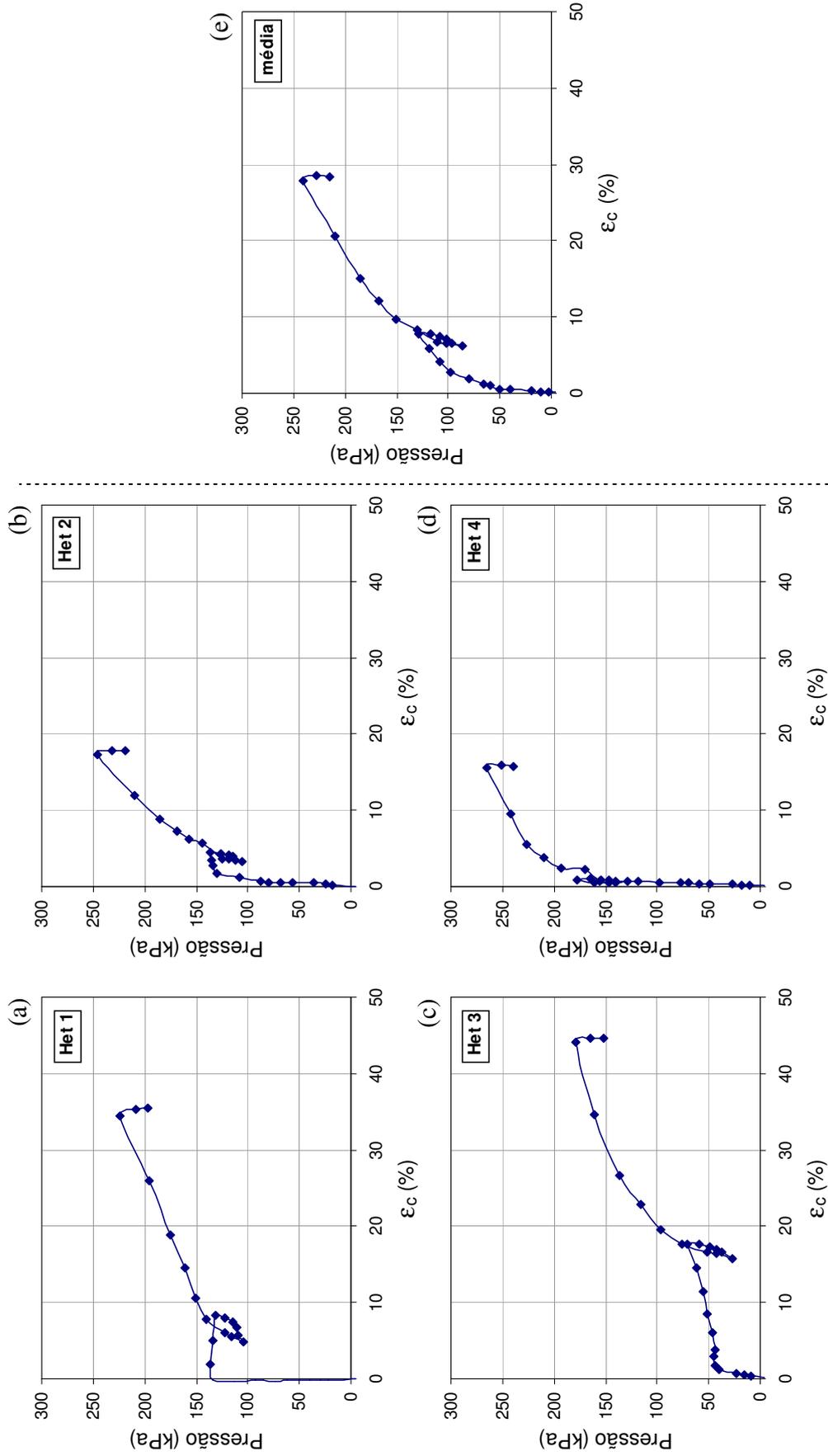


Figura 118 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT1 – 4m – SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

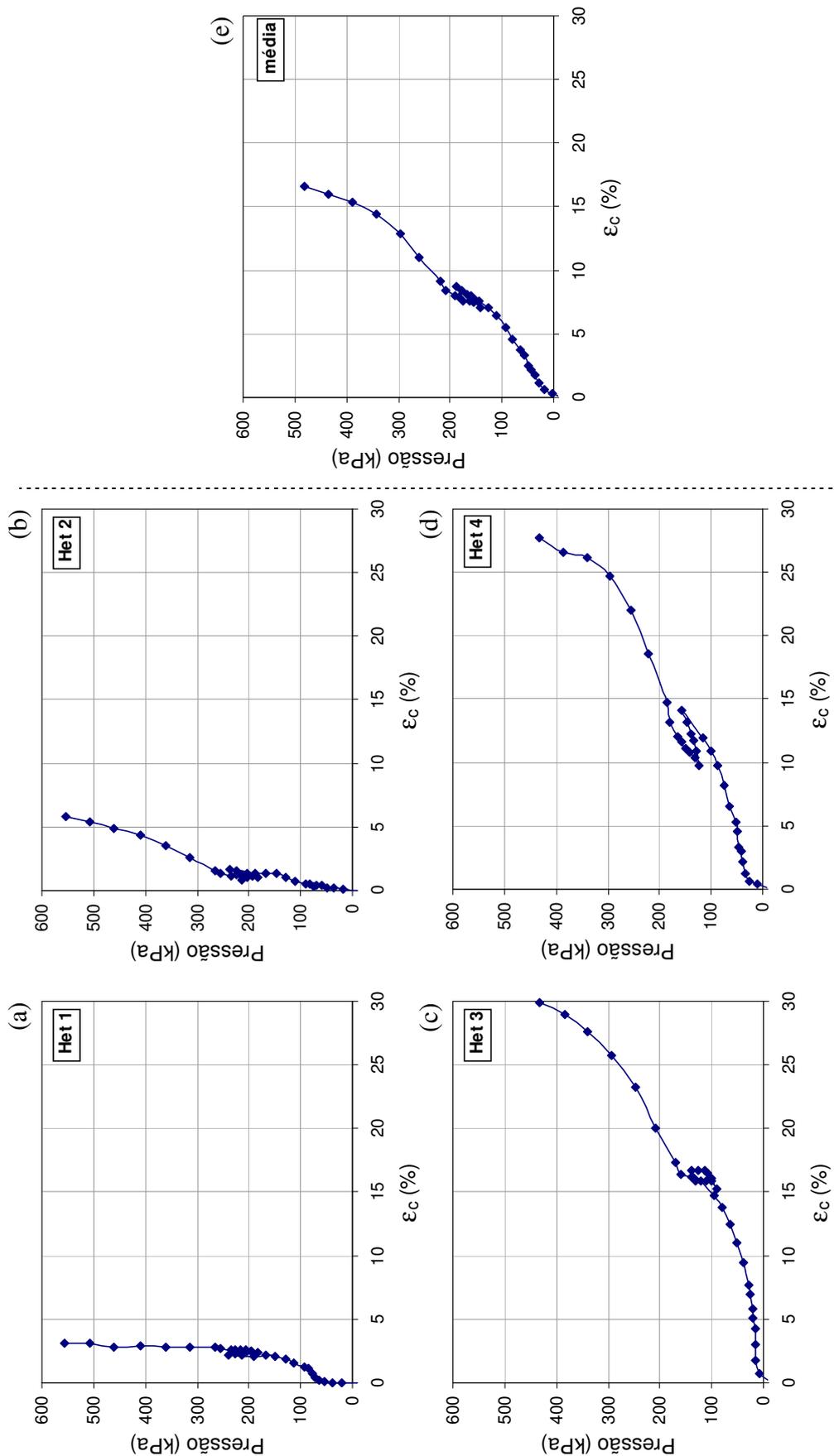


Figura 119 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT1 – 6m – SPI: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

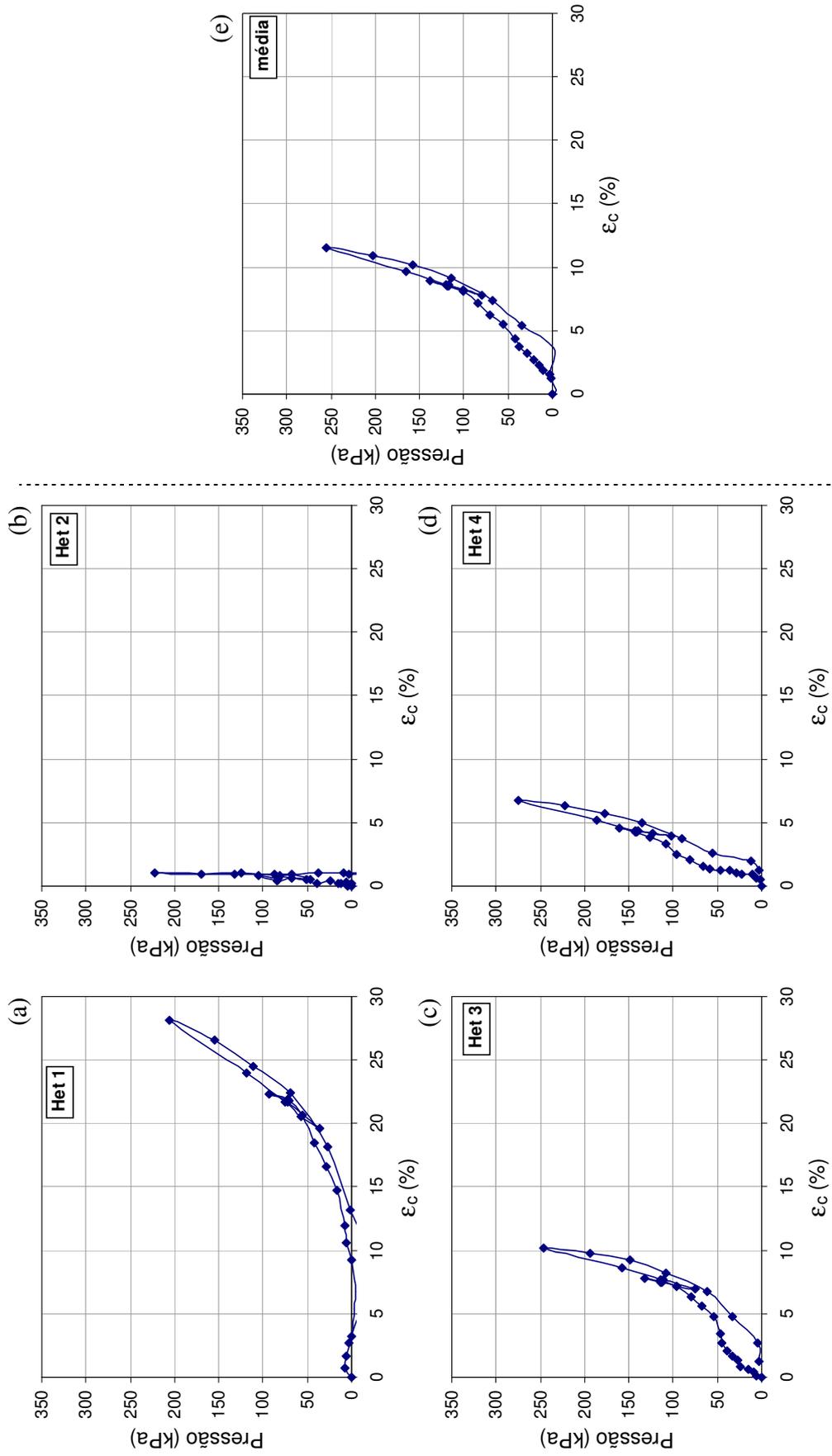


Figura 120 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT1 – 8m – SPI: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

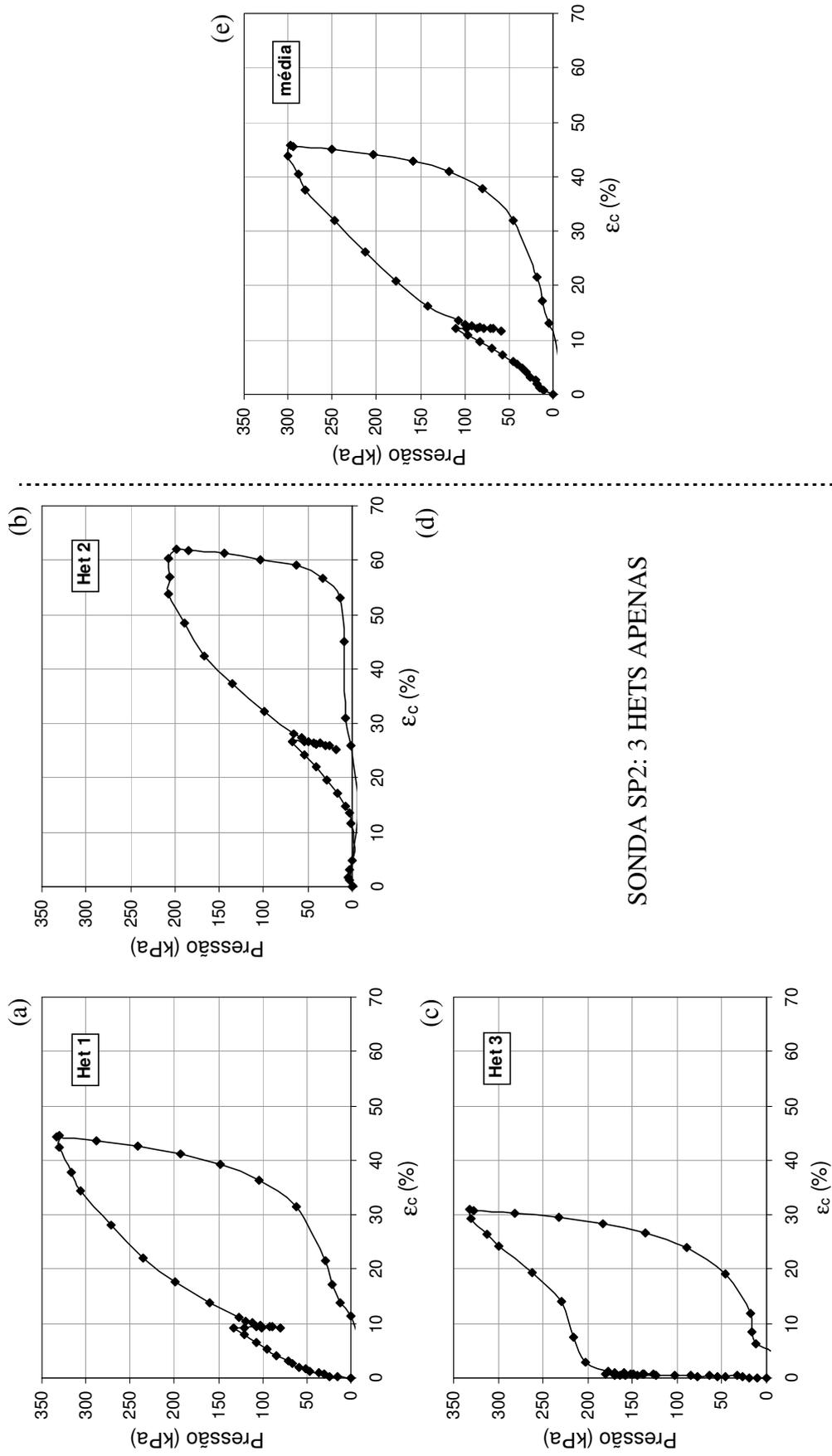


Figura 121 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT2 – 2m – SP2: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e).

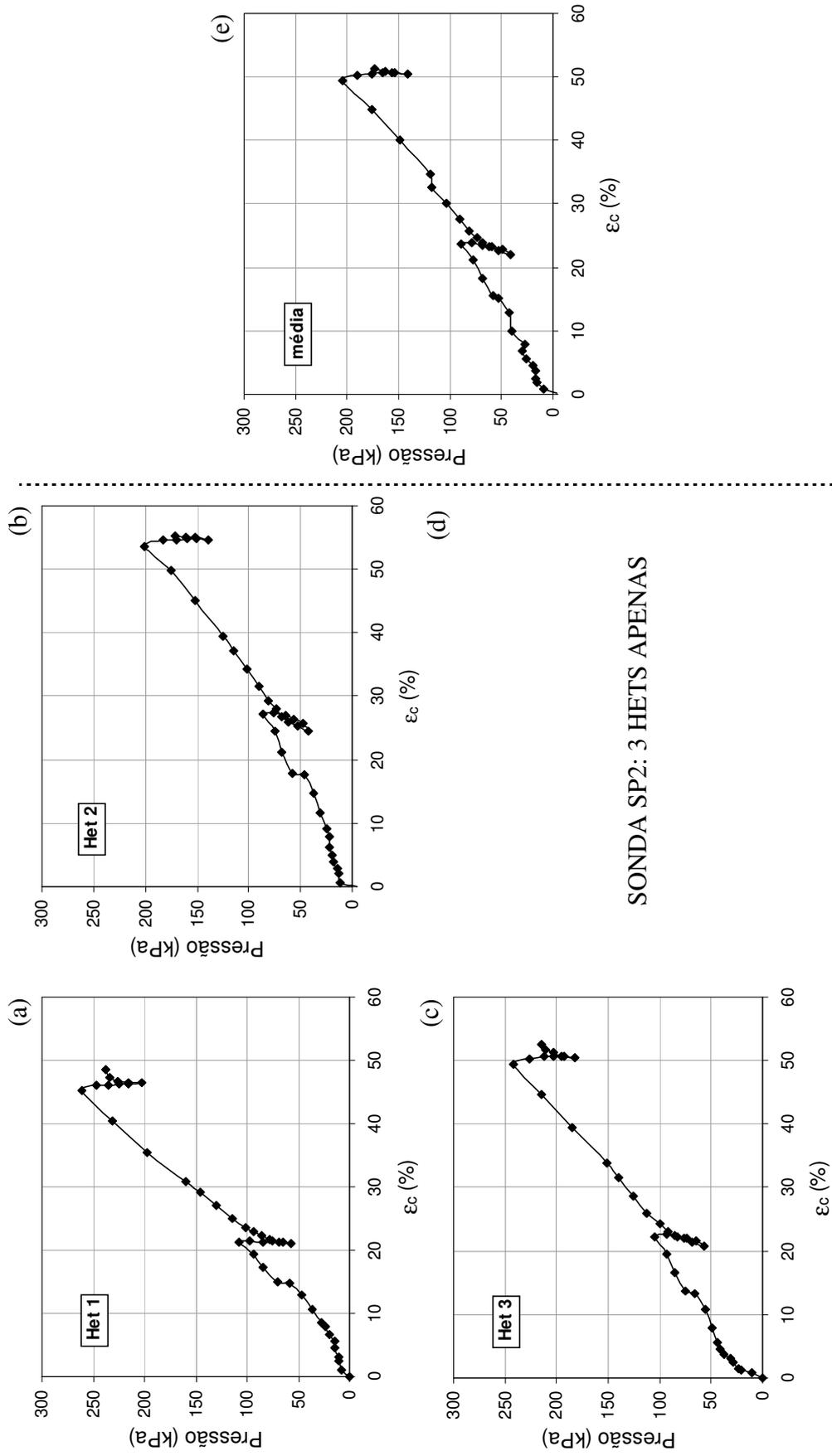


Figura 122 - Curvas pressiométricas corrigidas ensaio PMT2 – 4m -SP2: Hets independentes (a,b,c); média dos Hets (d)

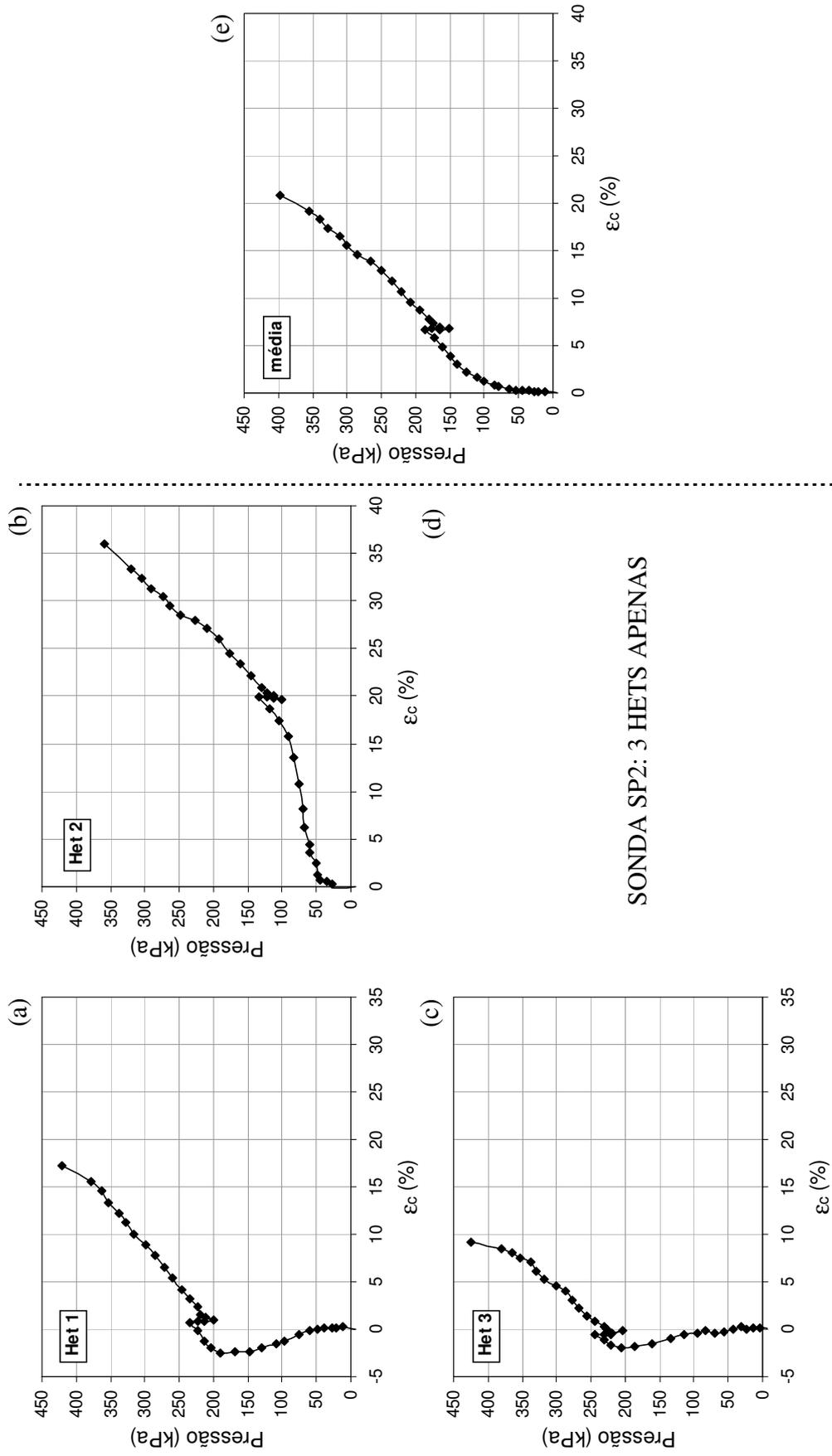


Figura 123 - Curvas pressiométricas corrigidas ensaio PMT2 – 6m -SP2: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

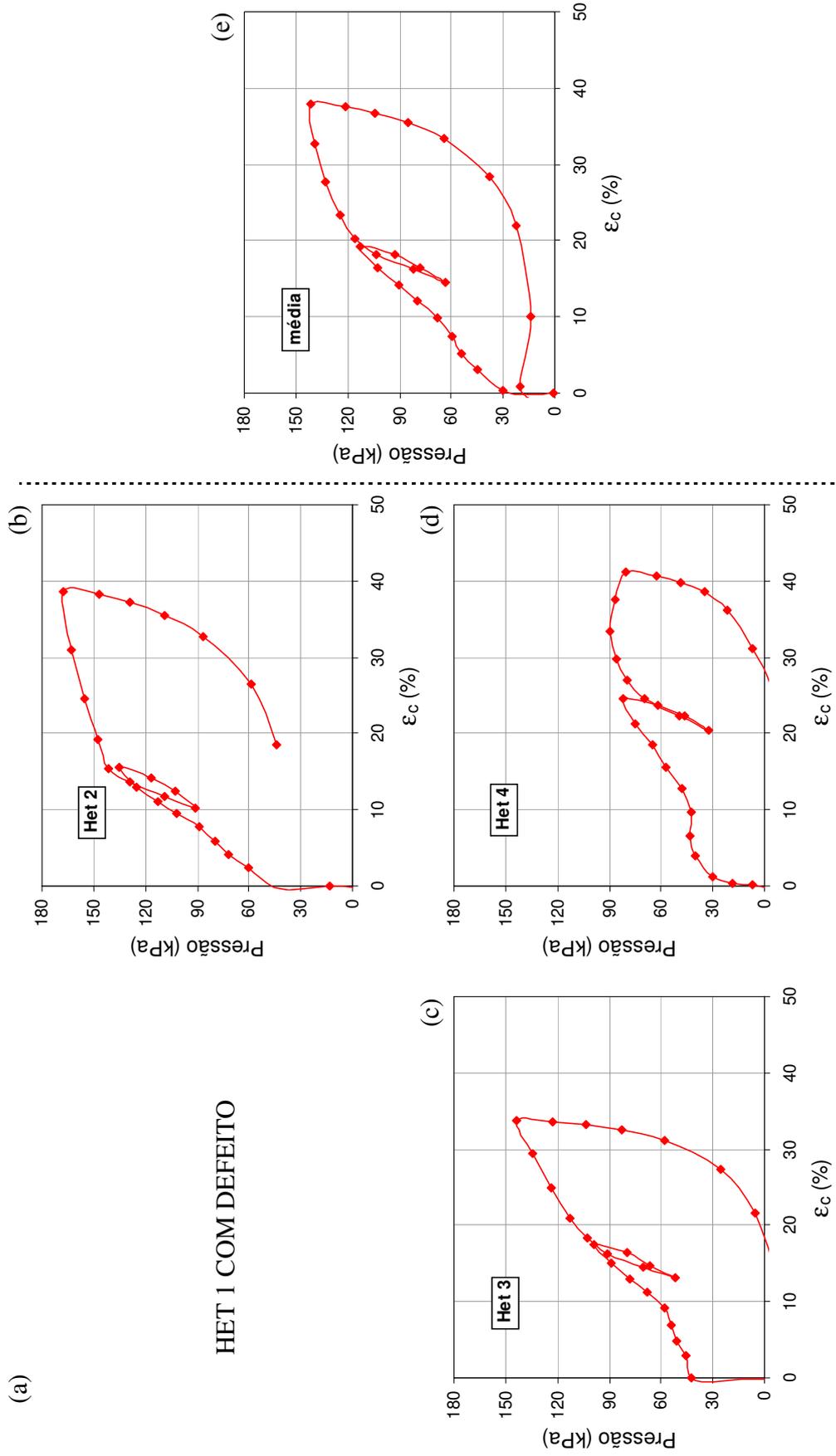


Figura 124 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT3 – 4m –SPI: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

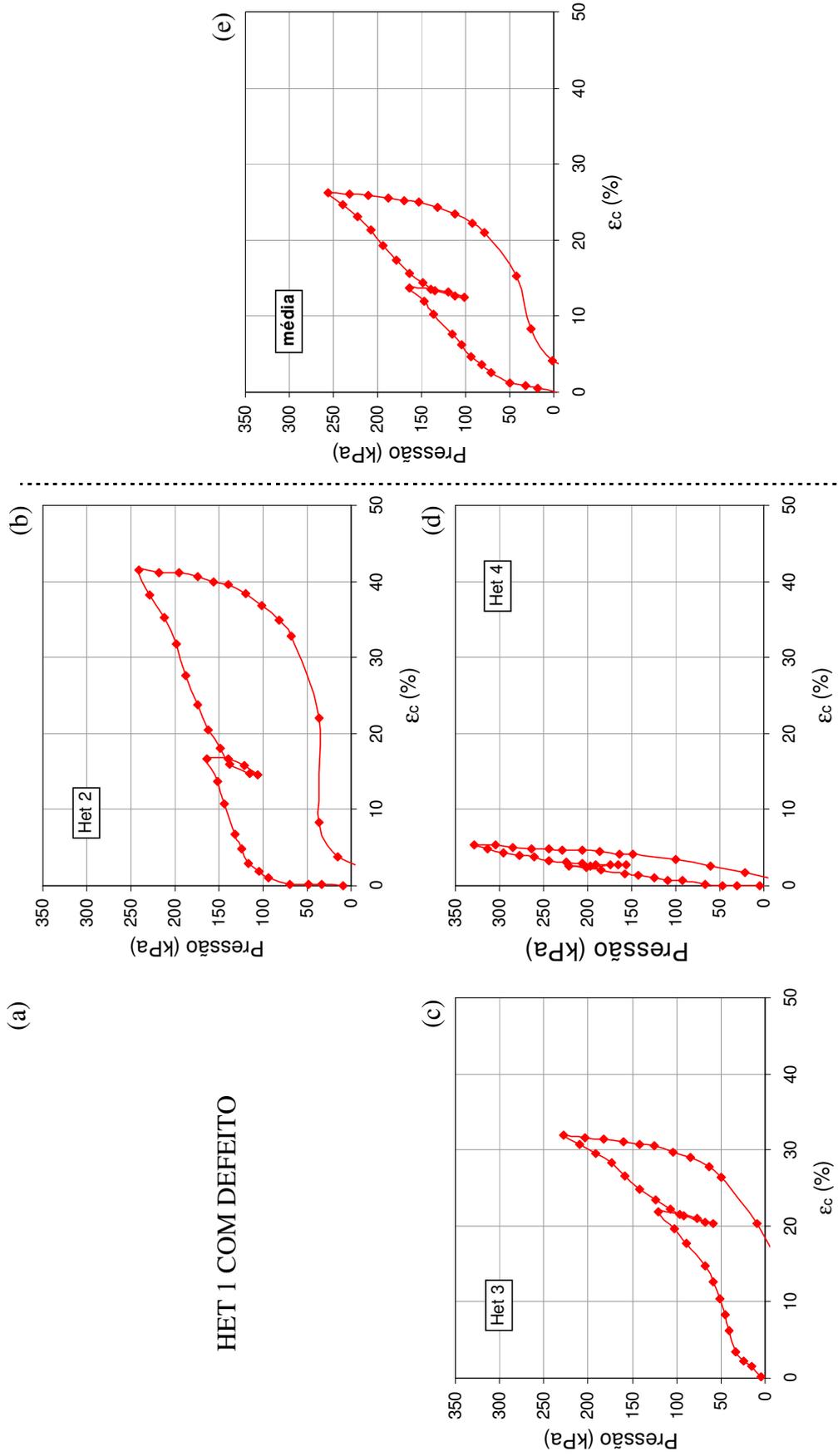


Figura 125 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT3 – 5m –SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

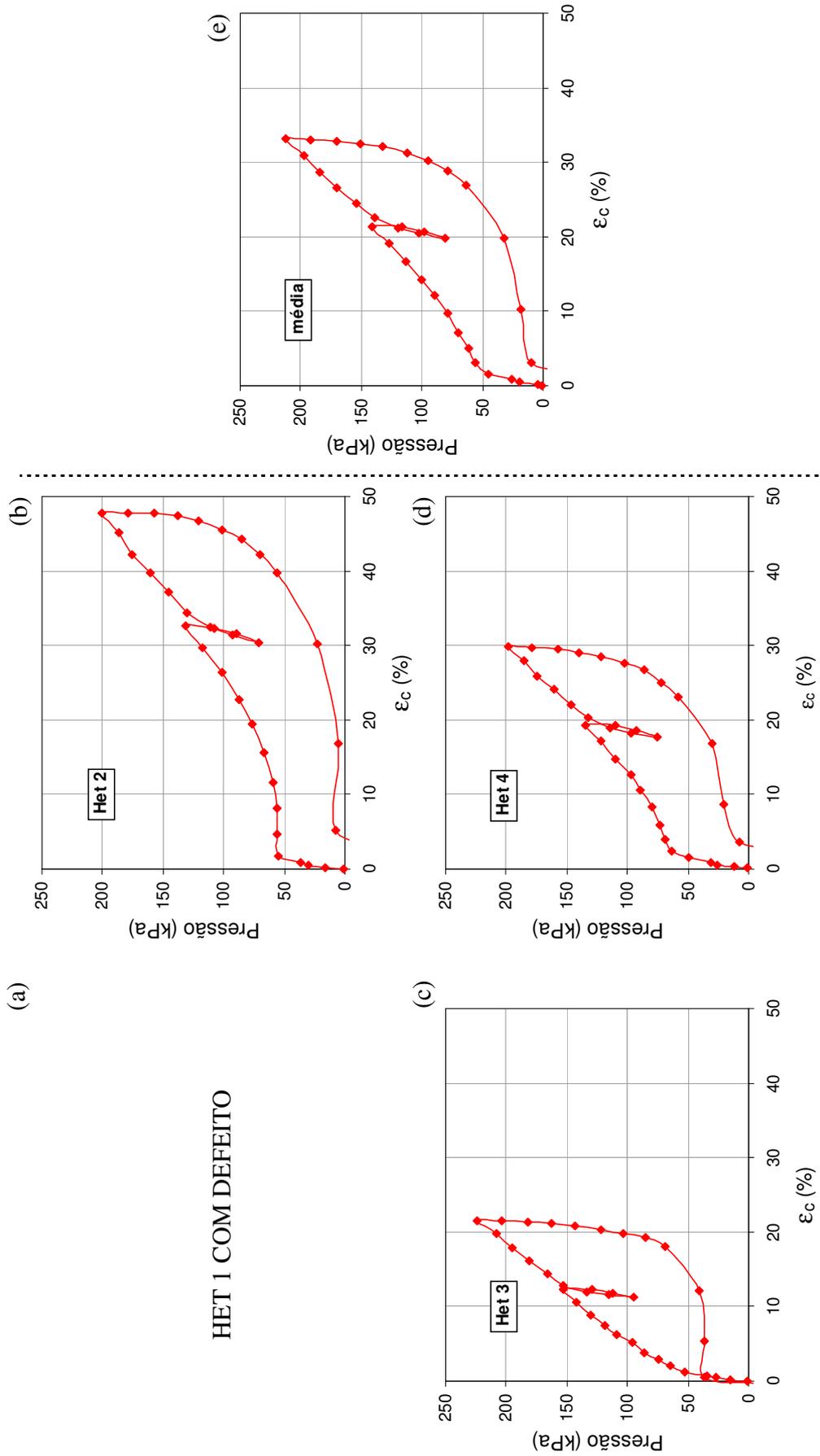


Figura 126 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT3 – 6m –SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

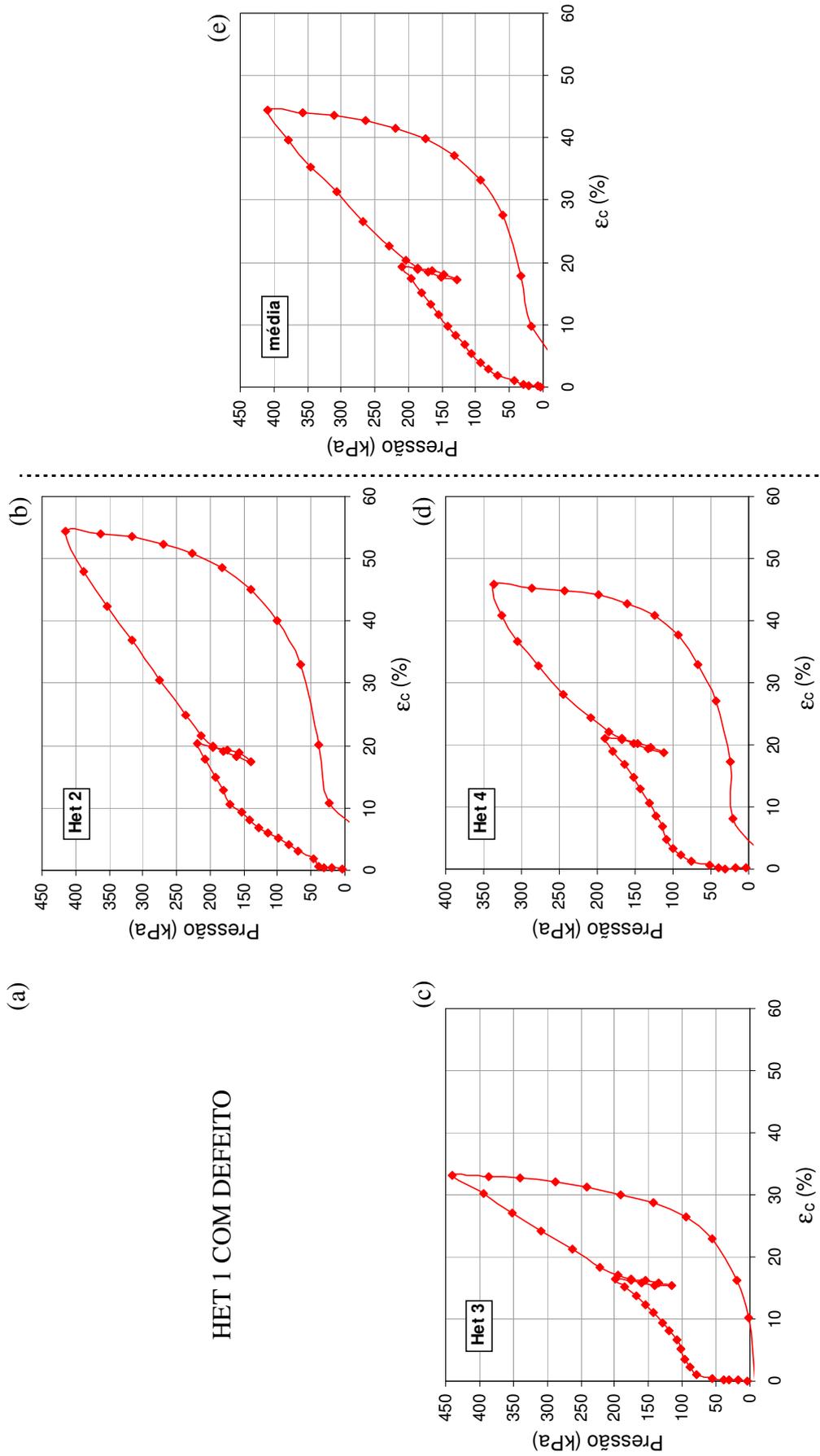


Figura 127 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT3 – 7m –SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

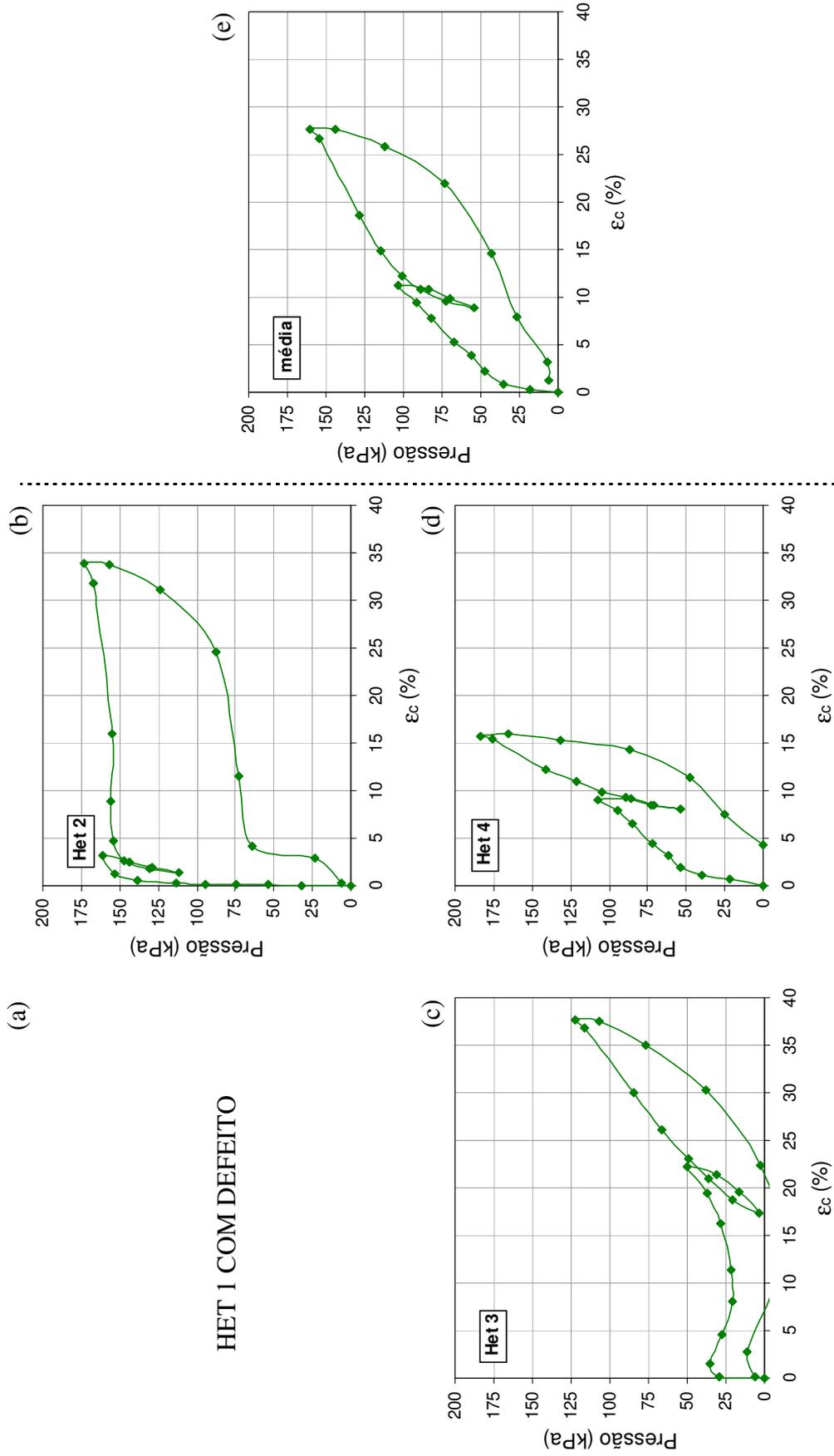


Figura 128 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT4 – 2m –SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

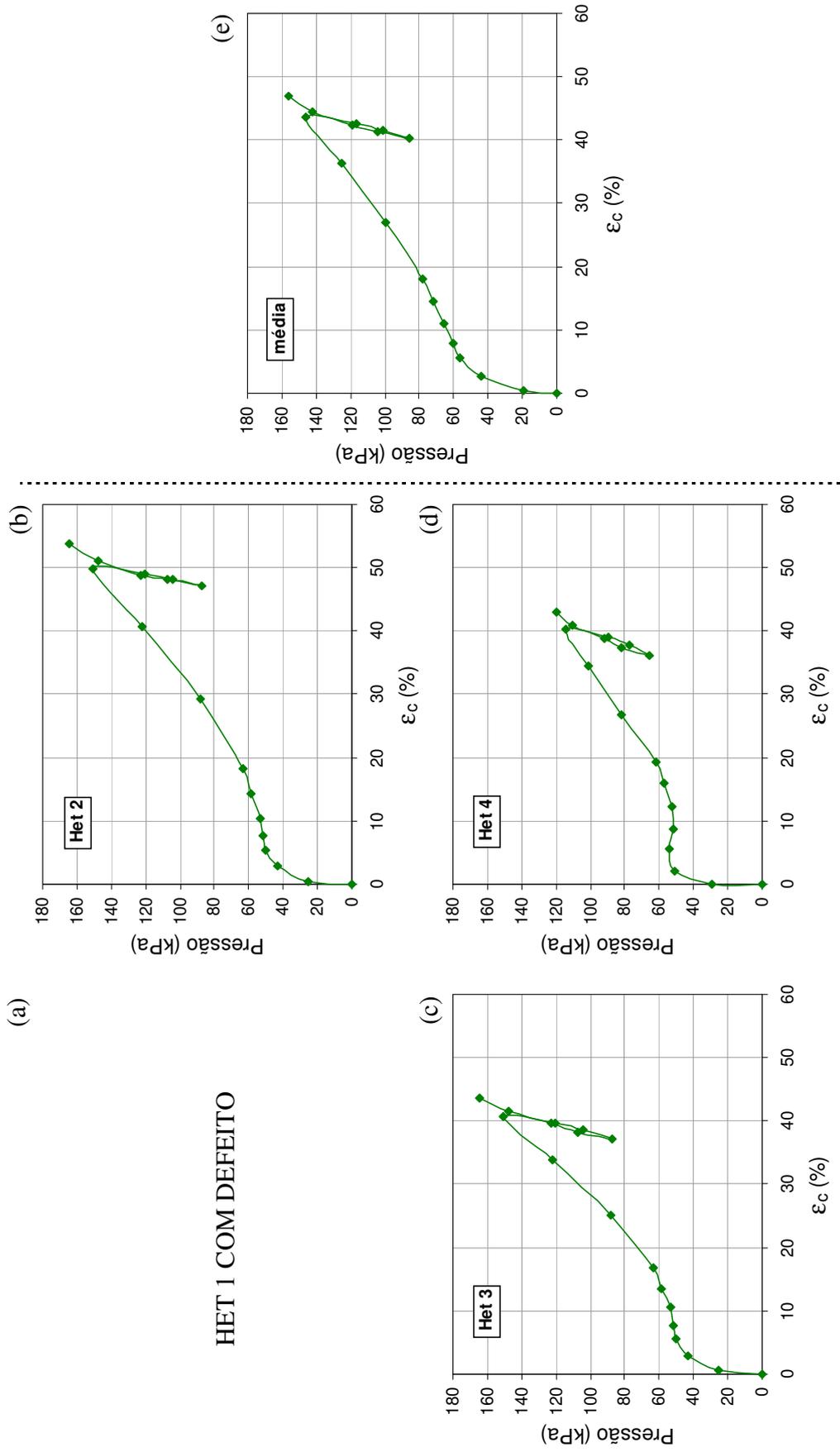


Figura 129 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT4 – 4m –SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

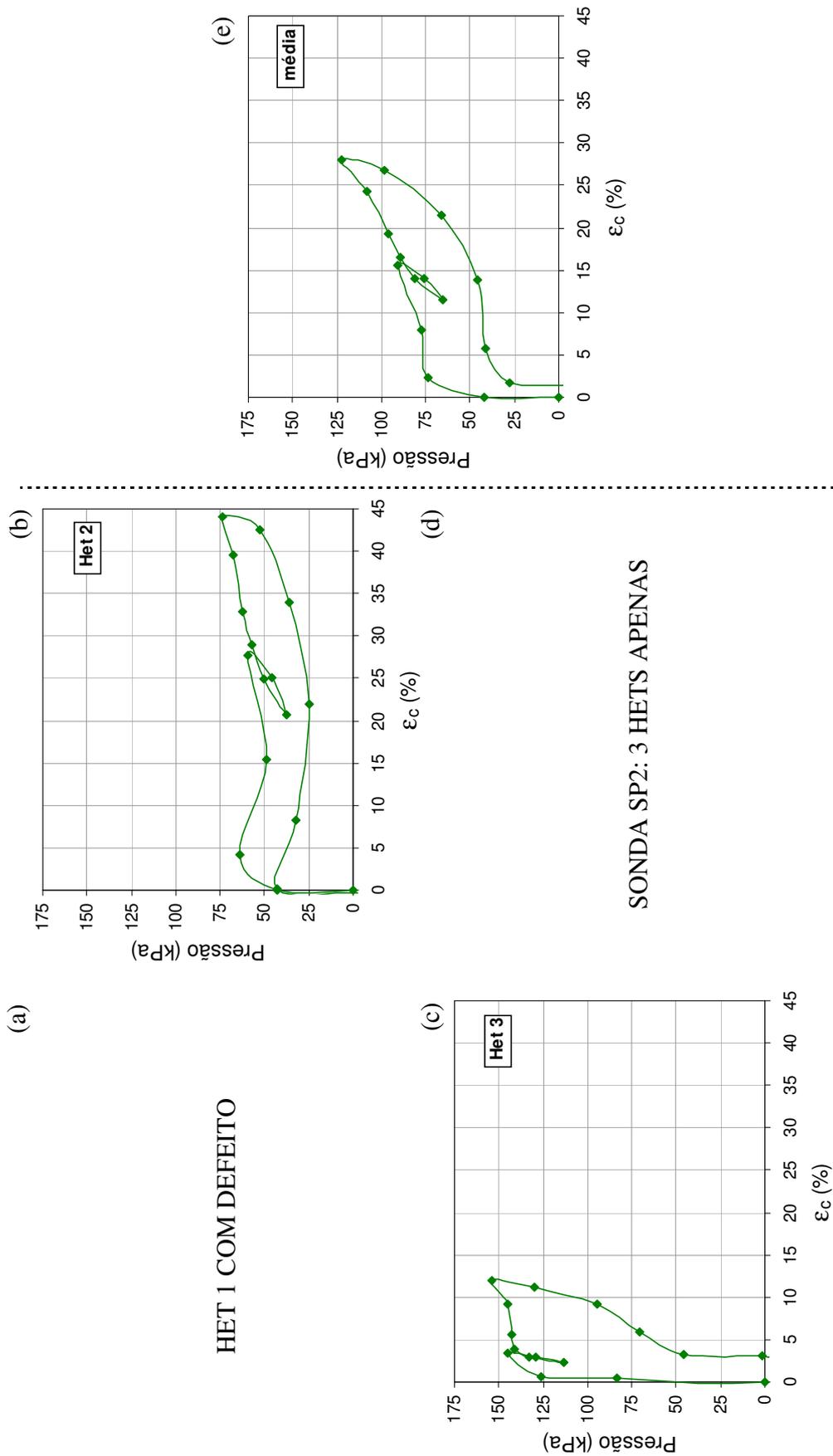


Figura 130 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT4 – 6m –SP2: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

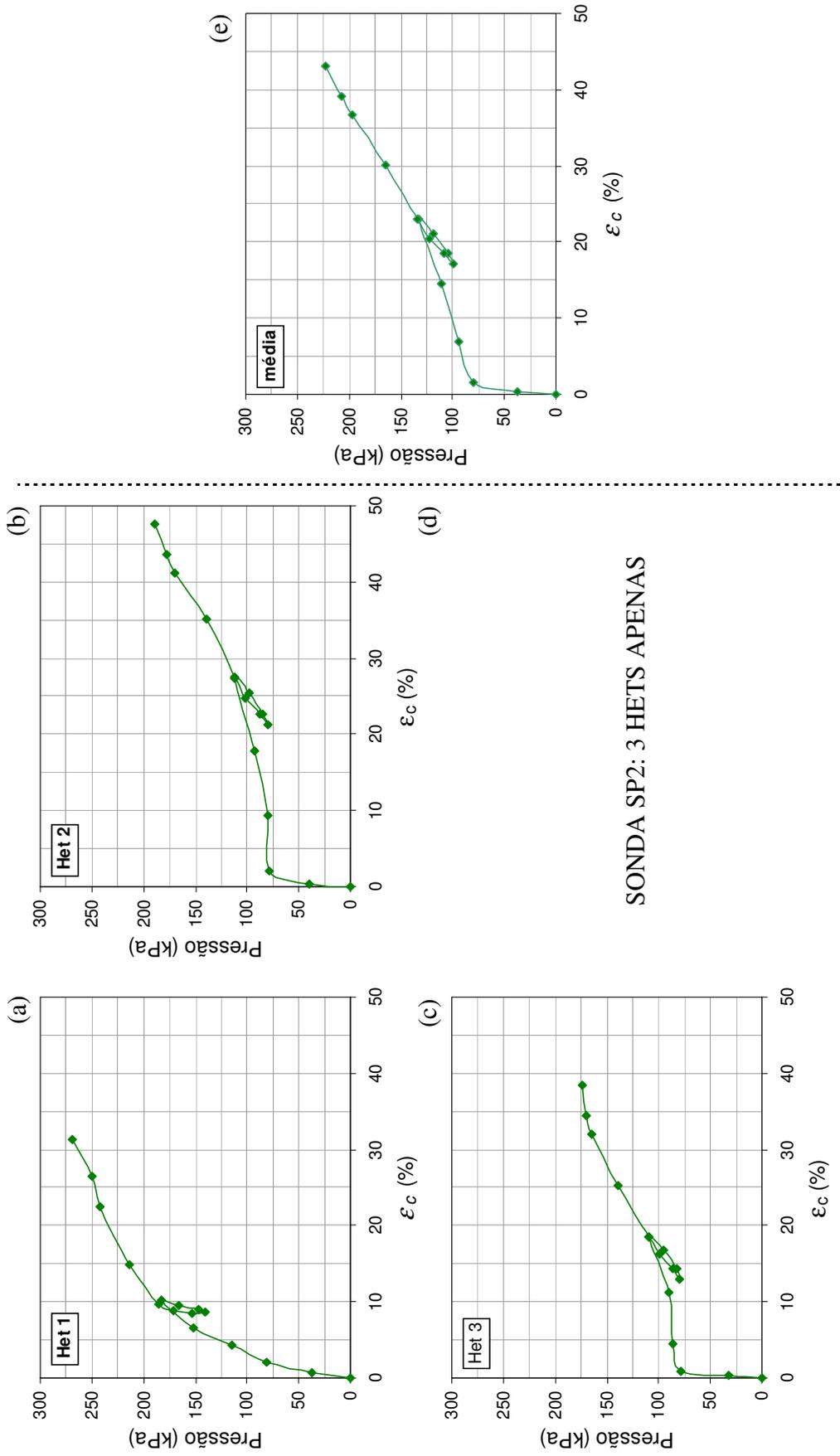


Figura 131 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT4 – 8m –SP2: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

### 6.2.2. Avaliação Qualitativa das Curvas Pressiométricas

De uma forma geral, a qualidade dos ensaios pode ser julgada inspecionando-se as curvas pressiométricas corrigidas, pois o comportamento destas pode ser indicativo, por exemplo, de pré-furos com diâmetros superiores ou inferiores ao da sonda, de desalinhamento do eixo da sonda, de ocorrência de materiais de diferente rigidez ou, ainda, da tipologia de solo. A inspeção da característica da curva durante a execução dos ensaios é importante para o operador realizar uma estimativa preliminar da qualidade dos dados e da metodologia de instalação, bem como, para ganhar informações válidas sobre o tipo de subsolo antecipadamente.

A Figura 132 apresenta algumas considerações sobre o comportamento de curvas pressiométricas e como estas podem ser indicativas da qualidade dos ensaios no que se referem às técnicas de instalação e tipologia de solo (Clarke, 1995). Estas informações qualitativas servem de base comparativa para as análises realizadas a seguir a respeito dos ensaios executados na Muribeca.

A avaliação global das curvas obtidas foi algo entre regular e bom, sendo que o pior conjunto foi o PMT1 e o melhor o PMT3. O comportamento de cada curva pressiométrica, por furo PMT, será avaliada a seguir.

#### **Furo PMT1 - metodologia (i)**

As curvas correspondentes as profundidades de 2m e 4m (Figuras 117 e 118) parecem ter boa qualidade e possuem um comportamento similar ao esperado em PC do tipo FDPM, onde valores iniciais de  $\varepsilon_c$  ocorrem em níveis de pressão da cavidade elevados devido ao efeito da cravação. Na profundidade de 2m foi observada uma ligeira tendência de escoamento a partir dos 30% de deformação (curva de materiais argilosos) enquanto que na profundidade de 4m não ocorreu o mesmo. Em ambas as profundidades os braços indicaram diferentes níveis de deformação sugerindo a ocorrência de materiais com rigidez variável.

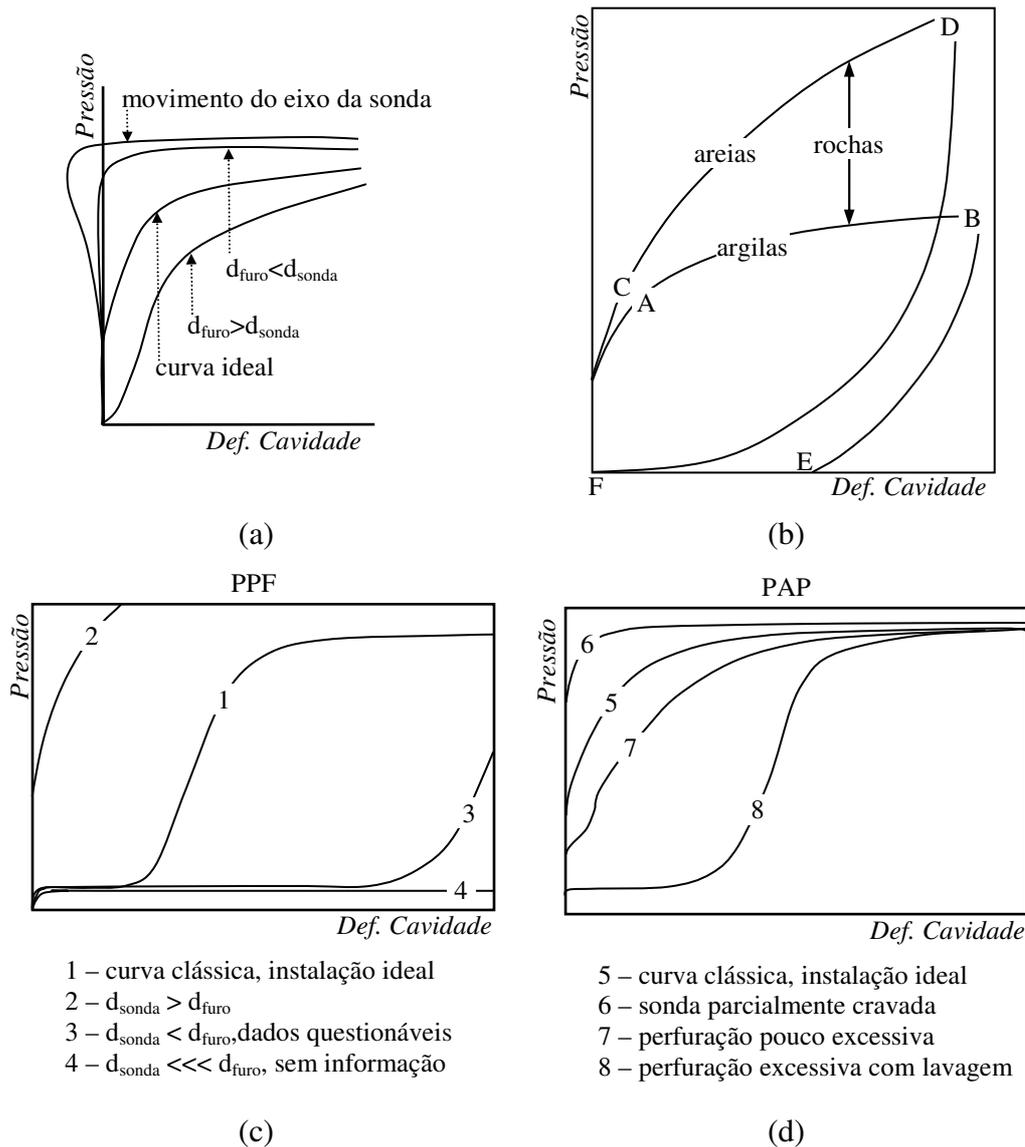


Figura 132 – Considerações sobre qualidade de ensaios pressiométricos segundo Clarke (1995): (a) efeito da instalação no trecho inicial de curvas com PAP; (b) efeito do tipo de solo nas curvas com PAP; (c) e (d) efeito da instalação no formato geral.

Por sua vez, os ensaios realizados nas profundidades de 6m e 8m (Figuras 119 e 120) parecem ter qualidade inferior, não apresentando o mesmo comportamento típico descrito acima bem como ciclos de descarregamento/re-carregamento e trechos de descarregamentos finais pouco convencionais. Acredita-se que isto se deve aos furos na membrana causados durante a cravação nestas profundidades. Além disto, dois resultados extremos chamam a atenção nestes dois ensaios: pequenas deformações para elevadas pressões e grandes deformações para baixas pressões. O primeiro caso (Figuras 119(a), (b) e 120(b)), está relacionado com a existência de materiais de elevada

rigidez (metais, pedregulhos, madeira, etc.) que limitam a expansão ou, ainda, ao arraste durante a cravação de grande quantidade de materiais plásticos e têxteis, abundantes naquele furo, e acúmulo em um ponto ao longo do corpo ou ponteira da sonda, aumentando a rigidez localizada. Acredita-se que a primeira hipótese seja mais plausível, pois a ocorrência de zonas como estas eram esperadas no aterro e até procuradas pela sonda para análise da variação do módulo de rigidez que será discutida posteriormente. O segundo caso, pode ser explicado pela existência de grandes vazios dentro da célula, ou pela ocorrência de materiais extremamente deformáveis ou, ainda, devido ao furo feito pela ponteira ser cerca de 7% maior que o diâmetro da sonda. O fato do furo se manter com o diâmetro igual ao da ponteira cônica após sua passagem explicaria o que ocorre na Figura 120(a) onde somente após cerca de 7% de deformações o meio oferece alguma resistência à expansão da cavidade, configurando um comportamento típico de ensaios em pré-furos de diâmetros maiores do que a sonda (*overdrilling*), o que de certa forma, justificaria a curva atípica, distinta do que se esperava obter com ensaios cravados.

### **Furo PMT2 – metodologias (ii) e (iii)**

Os ensaios no furo PMT2 (Figuras 121 a 123) foram executados em “pré-furo” de SPT conforme explicado anteriormente e as curvas produzidas parecem ter boa qualidade. O comportamento das curvas em profundidade foi variado e os resultados dos Hets em um mesmo ensaio foram diferentes entre si, com exceção da profundidade de 4m onde foram obtidos mais ou menos os mesmos valores de pressão e deformação para os três braços da sonda. Como exemplo desta variação e de acordo com as considerações apresentadas na Figura 132 tem-se que os comportamentos das curvas podem ser descritos da seguinte maneira:

- i. Figura 121(a) - PAP ou PPF bem justo;
- ii. Figura 121(b) - PPF com furo muito largo ou PAP com lavagem;
- iii. Figura 121(c) - PC e/ou material de rigidez elevada próximo ao Het;
- iv. Figuras 123 (a) (b) - PAP com desalinhamento no eixo da sonda.

Foi observada uma certa tendência de escoamento ( $p_L$ ) em algumas curvas da profundidade de 2m para níveis de  $\varepsilon_c$  superiores a 30% ou 40%, especialmente

na Figura 121(b) onde atingiu-se 60% de deformação da cavidade. Nos demais casos não houve a mesma tendência e sim um acréscimo de resistência com a deformação, típica de solos reforçados (Figuras 122(e) e 123(e)), e associada ao comportamento tensão-deformação em RSU. Segundo Clarke (1995), curvas pressiométricas com este comportamento, isto é, com inclinação mais acentuada no trecho final de carregamento em ensaios com PAP, são indicativas de materiais arenosos.

### **Furo PMT3 – metodologia (iii)**

Este furo foi o de melhor produtividade no que diz respeito ao desempenho da membrana, pois não houve perdas nos ensaios. Nestes, chegou-se até a profundidade de 7m, produzindo curvas boas e bem consistentes entre si (Figuras 124 a 127). Em todos os ensaios, notou-se um claro aumento de pressão de expansão com a profundidade para uma mesma deformação (por exemplo, em 20% para as curvas médias (e)) o que configura um ganho de resistência e aumento de rigidez. Esta hipótese é comprovada posteriormente após a determinação de  $G$  em profundidade.

Uma leve tendência de escoamento ( $p_L$ ) para deformações superiores a 30% foi notada em 4m (Figura 124) e 40% em 7m de profundidade (Figura 127(d)). Nos demais casos nota-se um ganho crescente de resistência com a deformação até valores superiores a 50% (Figura 127(d)), indicativo de solos reforçados com fibras ou arenosos. Cabe ressaltar que este ganho ocorre mais acentuadamente a partir de deformações próximas a 10%. Nestes casos se fossem traçadas as curvas com um limite das abscissas ( $\varepsilon_c$ ) desta ordem poderia até levar a crer que o material estaria escoando. Isto de certa forma é verdade pois se entende que, em alguns casos, o material amolgado pelo processo de instalação é carregado em magnitudes de deformação desta ordem e daí então entra em cena o lixo intacto imprimindo o reforço com fibras, aumentando a inclinação do trecho final.

Pelas curvas produzidas percebe-se, também, que o resíduo no PMT3 ponto parece estar mais homogêneo em termos de rigidez do que nos pontos anteriores, pois apenas houve um caso onde um braço identificou uma zona com pequenas deformações iniciais para grandes pressões (Figura 125(b)). Além disto, não foram identificadas zonas de vazios ou de baixíssima rigidez.

De uma forma geral as curvas apresentaram um comportamento inicial similar à curvas clássicas de um PAP onde a sonda é instalada bastante justa no furo e a pressão de descolamento (*lift-off*) se aproxima da tensão horizontal (Figura 132d), ou, ainda, similar a PC.

### **Furo PMT4 – metodologia (iii)**

Este furo foi realizado em uma célula diferente do que a anterior com lixo mais recente e, portanto, com um material menos resistente, o que pode ser notado ao comparar o nível de pressão de expansão exigido para mesmas profundidades.

As curvas obtidas (Figuras 128 a 131) parecem ter bom comportamento e similar ao notado anteriormente para um resíduo mais antigo no que diz respeito ao ganho de resistência com o nível de deformação, porém as inclinações são menores levando a crer que o efeito de reforço de fibras é menos acentuado no lixo novo. Por sua vez, estranhamente as pressões de expansão apresentam pequena variação com a profundidade, decaindo e aumentando (p.ex.  $\varepsilon_c = 20\%$  para as curvas médias (e)) numa faixa bem próxima, possivelmente demonstrando que a rigidez naquele furo não tem um ganho em função das tensões confinantes sendo praticamente constante até a profundidade investigada.

Duas curvas identificaram zonas mais rígidas nas profundidades de 2m (Figura 128(b)), onde houve um escoamento acentuado após certo nível de pressão, e em 6m (Figura 130(c)), onde o material resistiu mais. Em contrapartida, deformações da cavidade mais elevadas (>40%) ocorreram em diferentes profundidades para níveis de tensões baixos, o que ratifica a baixa resistência do resíduo ainda novo.

### **6.2.3.**

#### **Influência do Procedimento de Instalação nas Curvas $p \times \varepsilon_c$**

Em ensaios convencionais com PC do tipo FDPM (p.ex. Akbar, 2001) as curvas típicas apresentam um comportamento similar ao que está descrito na Figura 133(a) para o caso de solos argilosos, onde normalmente existe um trecho inicial de inclinação bastante elevada, isto é, com grandes pressões e pequenas

deformações, seguido de outro com certa curvatura até a pressão máxima do equipamento ou até a pressão limite e posterior descarregamento final.

Para tentar compreender melhor o que acontece na fase inicial dos ensaios descritos acima, seja a Figura 133(b) que representa as fases de um ensaio típico. Nestes casos, durante a cravação a ponteira cônica do pressiômetro cria uma cavidade que é maior que o diâmetro da sonda. Em seguida, ao início do ensaio, a membrana deixa o corpo da sonda no ponto B, cuja pressão (já descontada a rigidez da membrana) é requerida para vencer a pressão causada pela existência de água ou lama no furo ao redor da sonda, que é denominado  $p_0$  e cujo valor é inferior à pressão horizontal, pois houve um certo alívio de tensão no solo na profundidade central da sonda após a passagem do cone. Então, a membrana é expandida do ponto B até o ponto C, quando esta se encosta à parede do furo, ocorrendo em níveis de deformação pequenos correspondentes a diferença entre os diâmetros do cone e da sonda. Posteriormente, a pressão aplicada entre C e D é insuficiente para causar deformações significantes no solo e entre os pontos D e E os elementos de solo próximos a sonda são carregados elasticamente enquanto que no ponto E o solo adjacente à membrana começa a escoar e se comporta segundo um regime plástico. Durante esta fase, os elementos de solo localizados em diferentes distâncias radiais da sonda estão submetidos a diferentes estágios de carregamento. Aqueles perto da sonda estão na ruptura, enquanto que outros localizados a uma certa distância da sonda encontram-se na condição *in situ*. A pressão no início do regime elástico é denotada por  $p_h$  e o ponto E indica o instante do início do escoamento plástico que é dado pelo ponto de inflexão da reta virgem DE, correspondendo a uma pressão denominada  $p_y$ . Esta pressão é obtida pela interceptação das tangentes traçadas sobre a inclinação do regime elástico (DE) e sobre o ponto pós-escoamento (faixa de plastificação imediata). Akbar (2001) sugere como procedimento mais representativo da obtenção da pressão de escoamento tomar-se um tangente que cubra mais pontos da curva inicial de escoamento (ao invés de um único ponto como para  $p_y$ ) e traçar a previsão desta tangente de maneira retrospectiva até o eixo de pressão, fornecendo o valor da pressão de escoamento que é denominada  $p_F$ .

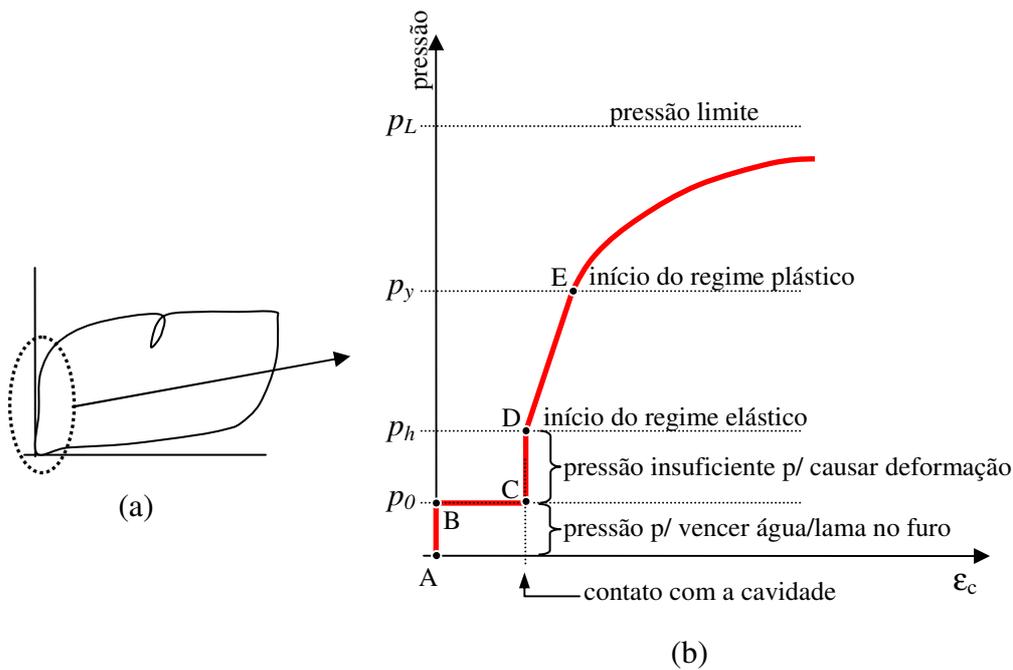


Figura 133 – Curva  $p \times \varepsilon_c$  ideal de pressiômetros de cravação do tipo FDP.

Como dito anteriormente, na campanha do aterro da Muribeca a cravação direta foi empregada somente no primeiro furo PMT, enquanto que nos demais casos utilizaram-se os furos da sondagem SPT para facilitar a instalação do pressiômetro e preservar as membranas. Em especial nestes últimos casos, após a execução do SPT, uma faixa cilíndrica de material, de raio desconhecido, havia sido amolgada pela passagem do amostrador ( $d_0=2''$ ), sendo representada pela região I da Figura 134(a). Findo o SPT, havia um intervalo de tempo, muitas vezes considerável, até a efetiva execução do ensaio PMT. Durante este tempo as paredes do furo sofriam um alívio de tensões o que possivelmente causava expansão do material no sentido do interior do furo, diminuindo o seu diâmetro. Esta faixa de expansão está representada pela região II da Figura 134(b). A magnitude dessa expansão é difícil de precisar, contudo acredita-se que os furos não fecharam devido ao comportamento de reforço por fibras intrínseco ao resíduo. Além disto, a resistência a penetração do pressiômetro foi monitorada com o manômetro acoplado ao cravador durante a instalação e em nenhum momento o valor das pressões foi expressivo, sendo o maior valor observado cerca de  $50\text{kg/cm}^2$ .

Contudo, considerando que houve alívio, então o diâmetro do furo tornou-se ainda menor do que o inicial ( $<2''$ ). Portanto, levando-se em conta que o diâmetro

da ponteira cônica é de 58mm e da sonda 54mm, logo maior do que  $d_o$  (50,8mm), então a cravação do pressiômetro (Figura 134(c)) tende a carregar o material das regiões I e II da parede do furo, ou seja, antes do início do ensaio a região em contato com a membrana representa um resíduo que possui uma história de carregamento (SPT), descarregamento (alívio) e recarregamento (cravação), em resumo, um material altamente amolgado e possivelmente de pouca resistência.

O comportamento descrito acima pode explicar o fato de algumas curvas obtidas apresentarem o seu trecho inicial (Figura 133) com inclinação inferior ao que é observado em pressiômetro de cravação do tipo FDPM, fazendo com que haja uma pequena deformação logo ao início do ensaio. As conseqüências diretas deste fato, no que se refere aos procedimentos de interpretação, são duas: primeiro que o trecho linear do regime elástico (DE – Figura 133) torna-se difícil de identificar visto que o material já está perturbado, ou seja, a identificação visual da pressão  $p_h$  pode ser bastante subjetiva; segundo que o ponto de inflexão do início do regime plástico (*onset of yielding*) também pode ficar obscurecido e, portanto, a indicação de  $p_y$  pode ser igualmente bastante subjetiva. Além disto, como as curvas obtidas sugerem um material com um comportamento de endurecimento (reforço de fibras), empregar uma tangente com inclinação correta que cubra mais pontos na curva de escoamento para obtenção de  $p_f$  pode, da mesma forma, ser dificultada. A conseqüência final do comportamento observado está na determinação subjetiva de parâmetros que são obtidos com base no trecho inicial da curva, como por exemplo, a tensão horizontal.

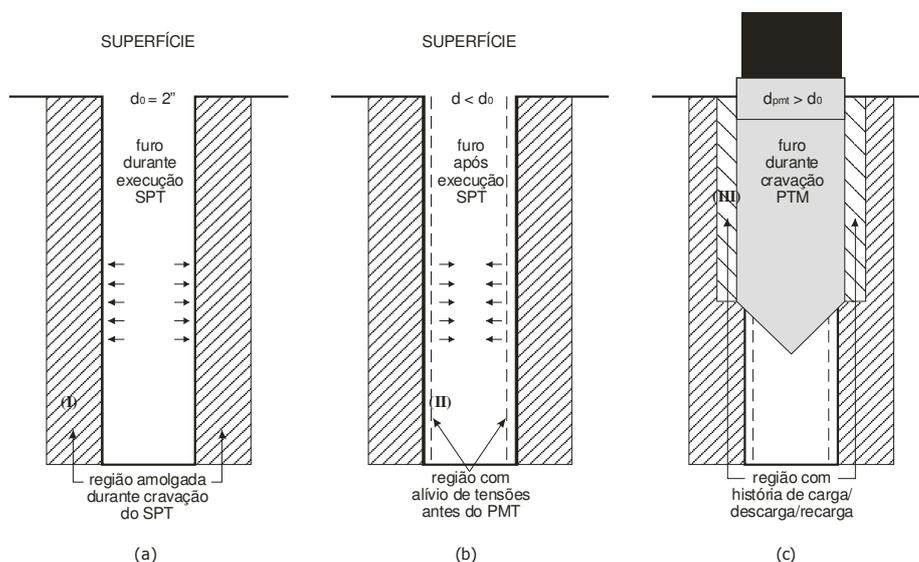


Figura 134 – Evolução do estado de tensão na parede do pré-furo do PMT.

## 6.2.4. Determinação do Módulo Cisalhante - $G$

### 6.2.4.1. Metodologia de Análise

O estudo da variação da rigidez nas células investigadas foi feito pela determinação do módulo cisalhante ( $G$ ) a partir das curvas pressiométricas. O módulo inicial não foi determinado, pois se considerou que este não representou a condição inicial do material, seja pela formação do furo (SPT) ou pela cravação direta da sonda. Portanto, foram determinados módulos de descarregamento – recarregamento ( $G_{ur}$ ) e módulos secantes de recarregamento ( $G_r$ ) para diferentes níveis de deformação. Além disto, a determinação de  $G_{ur}$  foi feita individualmente para cada curva pressiométrica por Het e para a curva pressiométrica traçada a partir de deformação média da cavidade na profundidade estudada, denominado de  $G_{urm}$ . Nestes casos, os módulos  $G_{ur}$  foram obtidos por meio do ajuste de todos os pontos do ciclo conforme o exemplo ilustrativo da Figura 135, enquanto que os módulos secantes  $G_{r\%}$  foram determinados tomando-se como origem o menor valor de deformação do ciclo e como pontos secundários, acréscimos de deformação até o valor máximo do ciclo (Figura 135). Em ambos os casos, o módulo foi calculado segundo a Equação 17 desconsiderando-se a relação  $r/r_0$ . A faixa média de  $\Delta\varepsilon_c$  dos ciclos de descarregamento foi da ordem de 2,68%, com máximo de 6%, enquanto que a  $\Delta p$  no descarregamento foi de 47,50kPa, com o máximo de 85kPa.

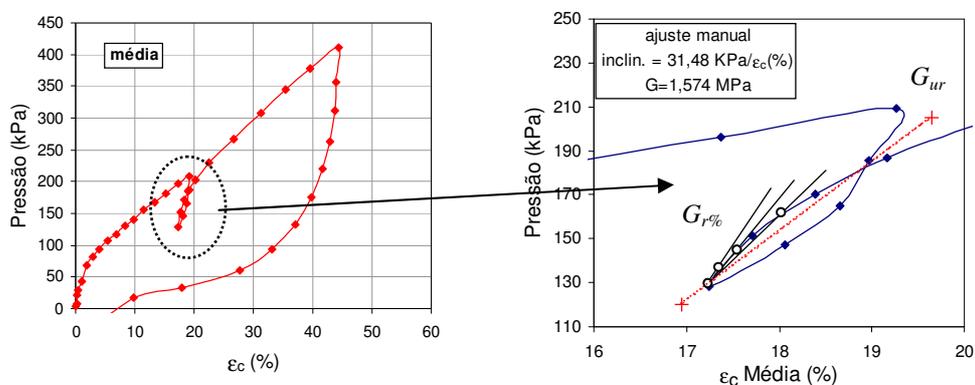


Figura 135 – Exemplo do procedimento para obtenção de  $G_{ur}$  e  $G_r$ .

#### 6.2.4.2. Variação de $G$ em Profundidade

Para avaliar a variação do módulo cisalhante com a profundidade das células investigadas foram determinados nas curvas  $p \times \varepsilon_c$  das Figuras 117 a 131 os seguintes módulos: (i)  $G_{ur}$  individualmente para cada Het (gráficos (a), (b), (c) e (d) das referidas figuras); (ii)  $G_{ur}$  pela curva média (gráfico (d) das respectivas figuras); (iii)  $G_{ur}$  pela média aritmética do item (i); e os módulos secantes  $G_{r0.1\%}$ , e  $G_{r1\%}$  das curvas médias. Os resultados encontrados estão apresentados na Figura 136, onde os gráficos (a), (b) e (c) são da célula C4 e o gráfico (d) da célula C5.

Nota-se, inicialmente, que os resultados da metodologia (ii) (linha vermelha) diferem da metodologia (iii) (linha azul), fornecendo valores menores e, portanto, mais conservadores. Além disto, apesar da dispersão pontual de resultados para uma mesma profundidade, especialmente no PMT1, pode-se observar uma tendência de aumento de rigidez a partir dos 4m de profundidade na célula C4 (lixo mais antigo). O mesmo não ocorre na célula C5 com lixo novo.

No furo PMT1 (Figura 136(a)) há uma grande dispersão nos resultados dos módulos pontuais para uma mesma profundidade teste, especialmente em 4m e 6m, refletindo a heterogeneidade do resíduo naquele local como identificado anteriormente. Estes picos nos módulos podem ser endossados também pelos valores elevados de resistência à cravação do pressiômetro (Figura 92) nas mesmas profundidades. Além disto, os resultados do SPT1 (Figura 109(a)) mostram um aumento de resistência à penetração até 4m, quando o seu valor é reduzido e torna-se errático.

A observação dos perfis erráticos da resistência de ponta durante a cravação do PC-RSU e da resistência à penetração do SPT, associados à identificação de materiais constituintes de maior rigidez durante a fixação dos trados de reação, leva à crer que o aparelho foi eficiente na identificação de zonas pontuais bastante rígidas, pois os valores máximos e mínimos do módulo foram respectivamente de  $Het4 = 4,11\text{MPa}$  e  $Het2 = 1,18\text{MPa}$  em 4m ;  $Het2 = 5,97\text{MPa}$  e  $Het4 = 0,57$  em 6m de profundidade, demonstrando a heterogeneidade e anisotropia do meio.

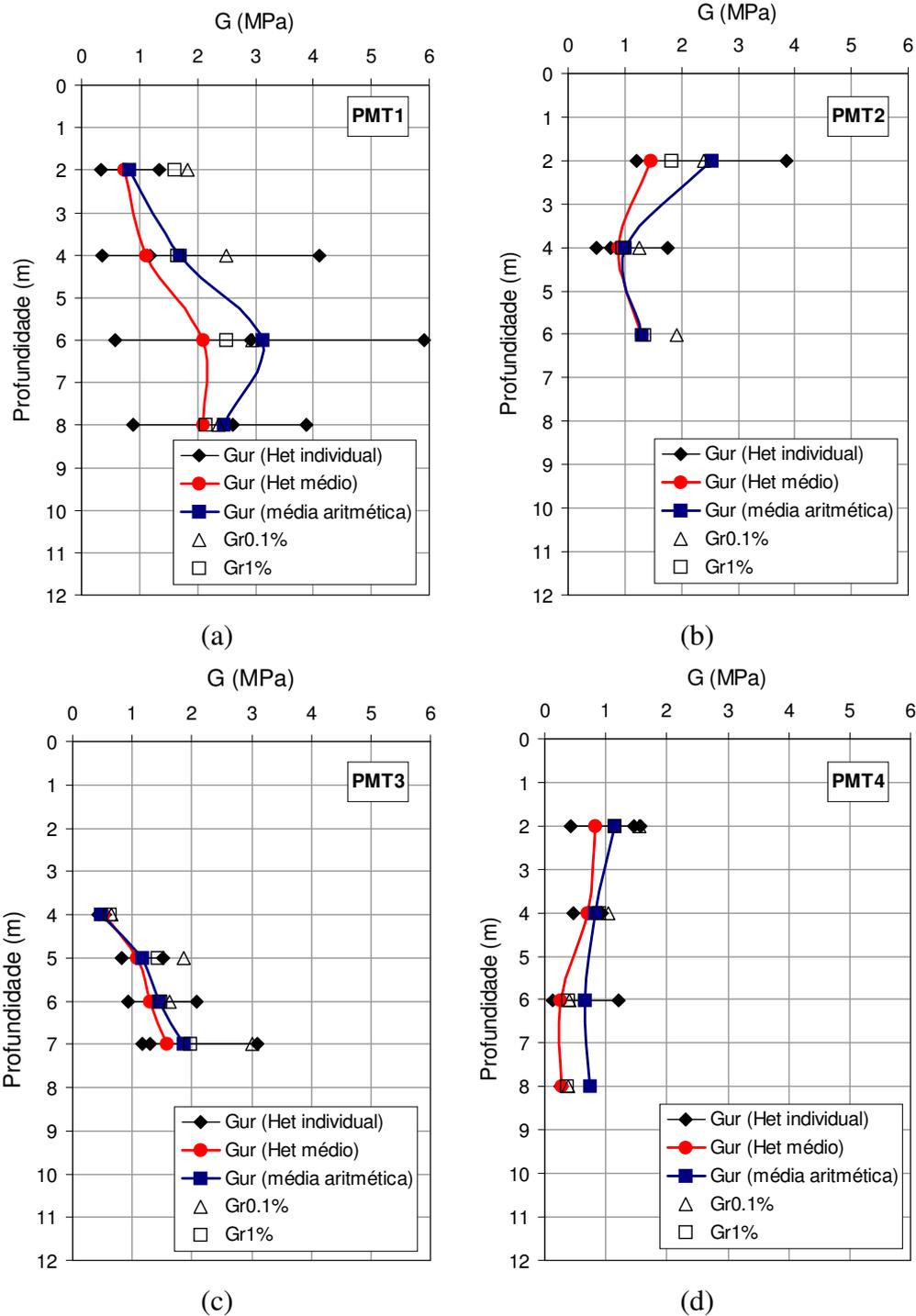


Figura 136 – Variação do módulo cisalhante com profundidade nas células investigadas.

O furo PMT2 (Figura 136(b)) apresentou menor dispersão nos módulos calculados individualmente por Het, porém possuiu menos pontos do que o anterior. Entretanto, a rigidez parece ser maior na profundidade inicial de ensaio (2m) possivelmente pelo efeito de camadas de cobertura. Esta rigidez mais acentuada na camada superficial pode ser notada pela análise dos resultados do CPT2 (Figura 110), onde ocorre um pico elevado logo próximo aos 2m. Em

seguida, o valor de  $G$  decresce até a profundidade de 4m onde há pouquíssima dispersão e posteriormente segue um padrão de crescimento similar ao observado no furo PMT1. Por sua vez, o SPT2 (Figura 109(a)) também apresenta um aumento de  $N_{spt}$  a partir da profundidade de 4m, contudo os dados limitados de  $G$  em profundidade foram insuficientes para endossar um padrão de comparação mais concreto.

O furo PMT3 (Figura 136(c)) apresentou também pouca dispersão entre os resultados dos módulos pontuais e uma tendência clara de aumento de rigidez com a profundidade, similar aos anteriores. Por sua vez, o ensaio de cone naquele local também indica um maior aumento de resistência à cravação a partir de 4m de profundidade (Figura 110). No caso do SPT3 (Figura 109(a)), há apenas uma singela tendência de aumento de  $N_{spt}$  naquela profundidade, porém nada conclusiva. Notou-se também que devido a menor dispersão de resultados calculados houve certa tendência de  $G_{urm}$  em igualar-se a média aritmética dos módulos.

O resíduo do furo PMT4 (Figura 136(d)) apresentou baixo módulo cisalhante e pequena variação até a profundidade investigada possivelmente devido a idade e nível de degradação do lixo naquele local, conforme o percentual de sólidos voláteis encontrados até a profundidade de 8m. Por sua vez, o ensaio do cone (Figura 111) indicou um aumento de resistência de ponta antagônico ao decréscimo de  $G$  para o trecho investigado, enquanto que o SPT4 (Figura 109(b)), desprezando-se um pico logo abaixo dos 2m, mostra claramente valores praticamente constantes de  $N_{spt}$ .

Levando-se em conta que nos três furos testes executados na célula C5 houve uma tendência visual de acréscimo no valor do módulo cisalhante determinado com a profundidade, obteve-se uma equação de ajuste linear para esta variação que está discriminada na Figura 137, tomando-se como referência os valores de  $G_{urm}$ . O ajuste não foi muito bom ( $R^2$ ) considerando o espalhamento dos resultados, porém fornece a possibilidade de estimar  $G$  em profundidade para um lixo com idade de cerca de 4 anos (idade estimada até 8m), segundo a Equação 41. Além disto, no gráfico da Figura 137 está traçada também a variação do módulo cisalhante de *Ménard* ( $G_M$ ) com a profundidade segundo Cartier & Baldit (1983), oriunda de uma investigação com PPF em um aterro controlado de RSU na França com teor de matéria orgânica da ordem de 32%, cuja operação

envolvia lançamento de camadas com 0,50m de espessura, com compactação mecânica por meio de rolo pé de carneiro e cobertura com solo. O valor de  $G_M$  foi obtido a partir do módulo de elasticidade de Ménard ( $E_M$ ) dos ensaios, segundo a Equação 42, considerando que a própria concepção de  $G_M$  envolve o emprego do coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) com um valor de 0,33 (Baguelin *et al.*, 1978).

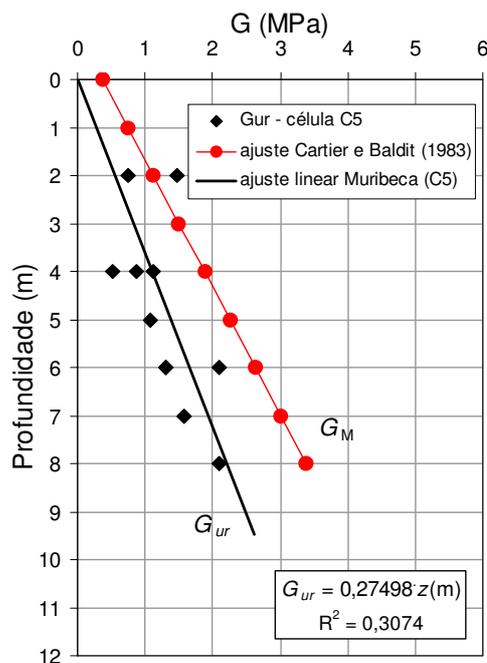


Figura 137 – Avaliação da variação de  $G$  com a profundidade na célula C5.

$$G_{ur} = 0,27496 \cdot z(m) \quad \dots(41)$$

$$E_M = 2(1 + \nu) \cdot G_M = 2,66 \cdot G_M \quad \dots(42)$$

A análise da Figura 137 mostra que há uma crescente diferença entre os dois ajustes, que pode ser explicada pelas características operacionais e pelos seus materiais constituintes, ambos distintos nos dois aterros. Sabe-se que no aterro da Muribeca não há compactação mecânica, a cobertura de solo é somente final e o percentual de matéria orgânica é de cerca de 60%, portanto, condições mais favoráveis para que o módulo cisalhante seja realmente inferior àqueles determinados no aterro da França. Além disto, a comparação emprega um valor de  $\nu$  de 0,33 e sabe-se que este valor pode ser maior para RSU, o que diminuiria a

diferença entre as tendências. Conseqüentemente, a comparação direta ilustrada na Figura 137 é bastante subjetiva.

O efeito do nível de tensões em  $G$  pode ser estudado na Figura 138(a) que mostra os módulos calculados na célula C5 contra o valor de pressão média do ciclo de descarregamento e recarregamento. Nela pode-se notar uma certa tendência de aumento da rigidez com a tensão que é consistente com o que normalmente é observado em materiais granulares (condições drenadas) como areias. Este comportamento já tem sido ressaltado tanto em laboratório (e.g. Jessberger & Kockel, 1993; Carvalho 1999) quanto em campo (Dixon & Jones, 1998) e é coerente com o aumento de rigidez com a profundidade, pois com o acréscimo da tensão efetiva oriunda da sobrecarga tem-se o acréscimo do módulo cisalhante. A análise da Figura 138(a) endossa qualitativamente o comportamento de endurecimento ou reforço por fibras notado anteriormente nas curvas pressiométricas de alguns ensaios.

Em contrapartida, o resíduo da célula C4 não apresentou um claro acréscimo de rigidez até a profundidade de 8m, possivelmente associado ao fato de ainda não ter ocorrido decomposição nem recalques expressivos. Contudo, pode-se tentar visualizar na Figura 138(b) um padrão de acréscimo de  $G$  com o nível de tensão similar à célula C5, apesar do número reduzido de ensaios. Neste caso, a associação com o comportamento de materiais granulares não é tão evidente.

A rigidez média do resíduo da célula C5 até a profundidade de 8m (aproximadamente 4 anos) foi muito baixa, na ordem de 1,30MPa para o nível de tensões e deformações dos ciclos, ou seja, cerca de 10 vezes menor do que a média esperada para uma argila pré-adensada. Por sua vez, na célula C4, com lixo novo (< 1ano), a rigidez média foi ainda menor, na ordem de 0,51MPa.

Para fins de análise comparativa entre os resultados da variação de  $G$  com a profundidade, bem como, da sua variação com o nível de tensões, as curvas da Figuras 137 e 138 foram re-traçadas na Figura 139, comparando-as com alguns resultados apresentados por Cartier & Baldit (1993) e Dixon & Jones (1998). No gráfico (a) da Figura 139 estão traçados os módulos  $G_{r1\%}$  da campanha da Muribeca nas células C4 e C5, os módulos cisalhantes de Ménard ( $G_M$ ) calculados segundo a equação 42 a partir dos dados obtidos por Cartier & Baldit (1993) com um PPF, além dos módulos  $G_{1\%}$  descritos por Dixon & Jones (1998) obtidos com um PAP. Nesse último caso, o módulo é um pouco diferente do  $G_{r1\%}$  e foi obtido,

para cada ensaio a partir do traçado de  $G_{ur}$ , proveniente de diferentes ciclos da curva pressiométrica, contra o nível de deformação dos mesmos. Com isto, uma relação linear foi obtida e o valor de  $G_{1\%}$  inferido. Por sua vez, o gráfico (b) da Figura 139 traz, além dos dados da Muribeca,  $G_{ur}$  obtidos por Dixon & Jones (1998) com o pressiômetro autoperfurante de Cambridge (*Camkometer*) em RSU, e uma compilação dos limites sugeridos pelos mesmos autores de valores de  $G$  oriundos de ensaios triaxiais e de compressão simples.

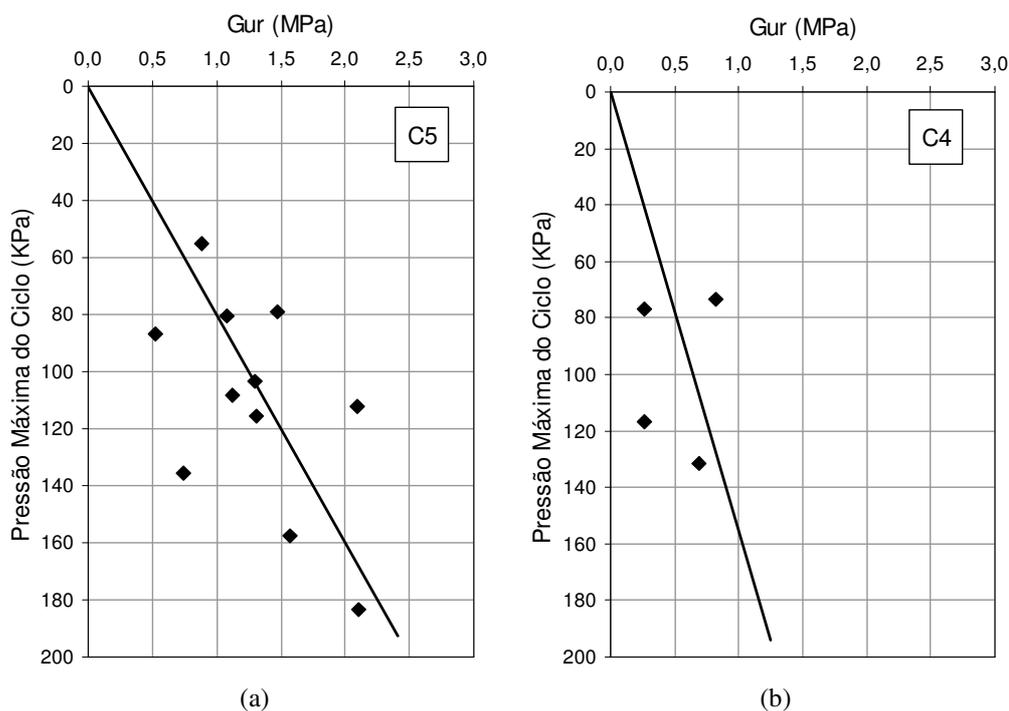


Figura 138 – Aumento da rigidez cisalhante do resíduo com o nível de tensões.

A análise da Figura 139(a) mostra que o módulo cisalhante do resíduo no aterro da Muribeca apresenta um aumento menor, porém mais constante, com a profundidade em relação aos dois outros aterros. No aterro da França há uma tendência de aumento de rigidez com posterior decréscimo em várias profundidades, possivelmente devido ao efeito da compactação mecânica e das camadas de solo. Acredita-se que os picos de resistência representem estas camadas. Este comportamento também é observado no aterro estudado por Dixon e Jones (1998), porém em outra escala. Acredita-se que os módulos determinados no aterro da Muribeca aproximam-se dos valores inferiores da variação de rigidez dos outros aterros, possivelmente representando materiais de mesma característica, isto é, sem compactação.

A Figura 139(b) mostra que o resíduo investigado na Muribeca situa-se próximo do limite inferior apresentado por Dixon e Jones (1998) a partir de ensaios de laboratório. Porém o espalhamento de resultados é bem menor para diversos níveis de pressão média.

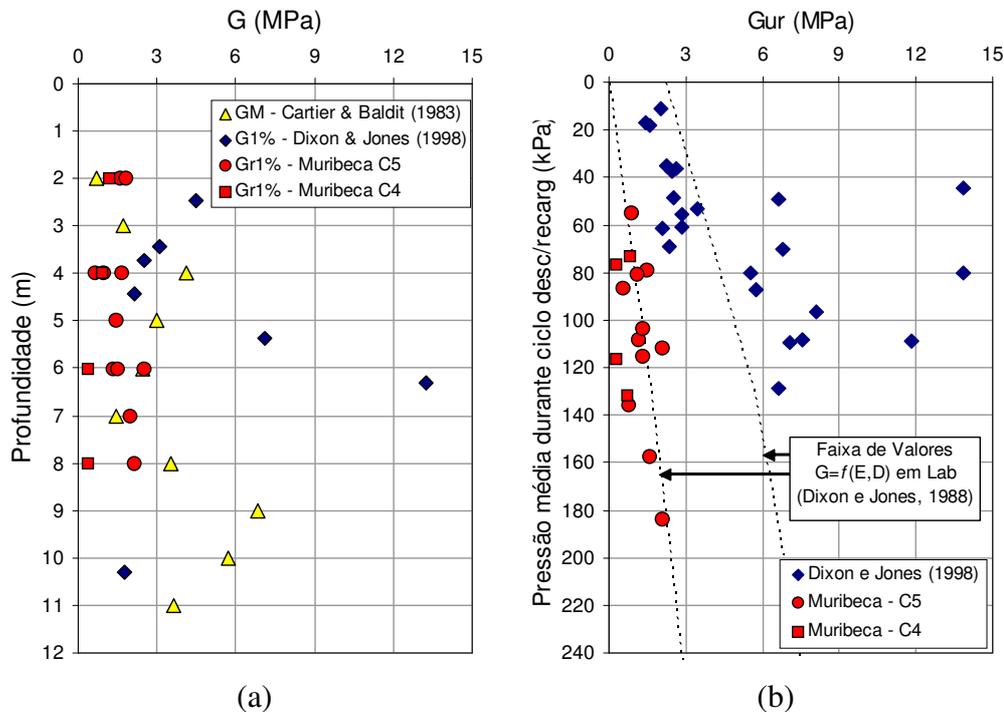


Figura 139 – Análise comparativa da variação  $G$  com profundidade e nível de tensões.

### 6.2.4.3.

#### Perfil de variação de $G$ com deformação

O estudo a seguir visa a avaliar se os valores  $G$  para RSU, similar aos solos, são dependentes do nível de deformação. Para tanto, os gráficos (a) e (c) da Figura 140 apresentam o estudo da variação de  $G_r$ , normalizado para o valor de  $G_{ur}$ , em relação ao intervalo de deformação da cavidade no ciclo de descarregamento e recarregamento ( $\Delta\epsilon_c$ ) em escala logarítmica, para as células C5 e C4. Cada curva representa um ensaio para uma determinada profundidade. Pode-se observar que há a tendência natural de  $G_r$  em igualar-se ao valor de  $G_{ur}$  para valores próximos da amplitude máxima de deformação do ciclo. Além disto, em ambas as células, para uma mesma profundidade, a relação  $G_r/G_{ur}$  varia pouco para intervalos de deformação pequenos ( $<0.1\%$ ), todavia, a comparação entre os resultados em diferentes profundidades mostra que mesmo para  $\Delta\epsilon_c < 0,1\%$  a diferença relativa

pode ser grande. Por outro lado, a relação  $G_r/G_{ur}$  somente apresenta pouca variação para diferentes profundidades de ensaio quando  $\Delta\epsilon_c$  é maior que 1%.

Por sua vez, os gráficos (b) e (d) da Figura 140 apresentam a variação do módulo cisalhante secante, normalizado em função do módulo para 0,1%, contra  $\Delta\epsilon_c$  do ciclo, para as duas células investigadas. Em todos os casos, curvas hiperbólicas foram empregadas para melhor ajustar os comportamentos observados, estando as mesmas reescritas nas Equações 43 a 46 a seguir.

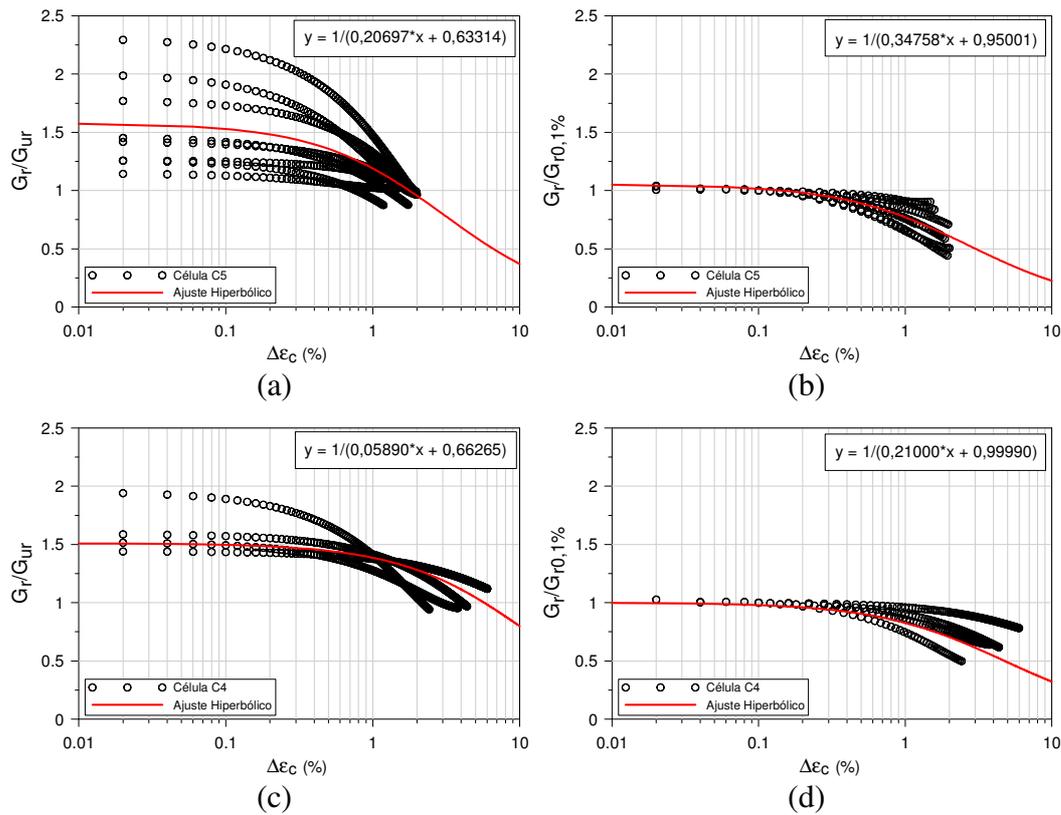


Figura 140 – Avaliação da variação do módulo cisalhante do resíduo com o nível de deformação do ciclo: C5 (a) e (b); C4 (c) e (d).

$$\frac{G_r}{G_{ur}} = \frac{1}{0,20697 \cdot \Delta\epsilon_c + 0,63314} \quad (\text{célula C5}) \quad \dots(43)$$

$$\frac{G_r}{G_{r,0,1\%}} = \frac{1}{0,34758 \cdot \Delta\epsilon_c + 0,95001} \quad (\text{célula C5}) \quad \dots(44)$$

$$\frac{G_r}{G_{ur}} = \frac{1}{0,05890 \cdot \Delta\epsilon_c + 0,66256} \quad (\text{célula C4}) \quad \dots(45)$$

$$\frac{G_r}{G_{r0,1\%}} = \frac{1}{0,21000 \cdot \Delta\epsilon_c + 0,99990} \quad (\text{célula C4}) \quad \dots(46)$$

De acordo com as Equações 43 e 45, a relação  $G_r/G_{ur}$  assume um valor unitário quando  $\Delta\epsilon_c$  é igual a 1,77% e 5,73%, nas células C5 e C4, respectivamente. Estes valores quando substituídos nas Equações 44 e 46 e considerando que  $G_{r1,77\%} = G_{ur}$  na C5 e  $G_{r5,73\%} = G_{ur}$  na C4, fornecem os seguintes resultados:

$$G_{ur} = 0,639G_{r0,1\%} \quad (\text{célula C5}) \quad \dots(47)$$

$$G_{ur} = 0,454G_{r0,1\%} \quad (\text{célula C4}) \quad \dots(48)$$

O valor de  $G_{r0,1\%}$  é normalmente empregado como referência nas análises de variação de  $G$  com deformação em ensaios pressiométricos quando não se dispõe do módulo dinâmico ( $G_0$  ou  $G_{max}$ ). Segundo Pinto & Abramento (1998), os módulos pressiométricos, obtidos com PAP para 0,1% de deformação, correspondem à cerca de 40% do módulo dinâmico determinado em ensaios de propagação de onda (e.g. cross-hole e piezocone sísmico) em um solo residual. Igualmente, Sampaio Junior *et al.* (2002), por meio do emprego de metodologia alternativa de instalação do PAP no mesmo local, indicaram diferenças entre  $G_0$  e  $G_{r0,1\%}$  da ordem de 20% a 25% em um caso, e 30% a 40% em outro caso. Porém, como não existe informação na literatura a respeito de correlações do gênero em se tratando de RSU, tomar-se-á como base uma faixa intermediária de variação desta diferença para as análises subsequentes, isto é, um valor de 30%. Assim, pode-se tentar relacionar  $G_{ur}$  com  $G_0$ , alterando as Equações 47 e 48 para:

$$G_{ur} = 0,192 \cdot G_0 \quad (\text{célula C5}) \quad \dots(49)$$

$$G_{ur} = 0,136 \cdot G_0 \quad (\text{célula C4}) \quad \dots(50)$$

Com isto tem-se que o módulo  $G_{ur}$  é cerca de 19% do módulo máximo na célula C5 e 13% na célula C4. A relação  $G_{ur}/G_0$ , como foi determinada, representa um valor médio de uma camada de certa idade. A profundidade máxima teste nas células foi de 8m e considerando as premissas apresentadas na Figura 141, esta profundidade representa idades estimadas de 4,4 anos e 0,8 ano para as células C5 e C4, respectivamente.

Há de se aferir, ainda, a proporção sugerida entre os dois módulos através de ensaios de campo do tipo *cross-hole*, porém não há dados sobre ensaios deste tipo realizados no aterro da Muribeca. Sabe-se que a determinação das velocidades de propagação de onda em RSU é muito influenciada pelas características do resíduo como idade e densidade, portanto a comparação com dados da literatura deve ser criteriosa.

#### 6.2.4.4. Influencia da Idade do Resíduo em G

Segundo informações da administração do aterro, a idade do resíduo nos pontos onde foram executados os ensaios pressiométricos segue o padrão discriminado na Figura 141. Pode-se, portanto, tentar estimar as taxas de enchimento das células considerando uma progressão de avanço linear. Os valores estimados encontram-se na Figura 141. Assim, é possível estimar a idade em profundidade do resíduo segundo a Equação 51.

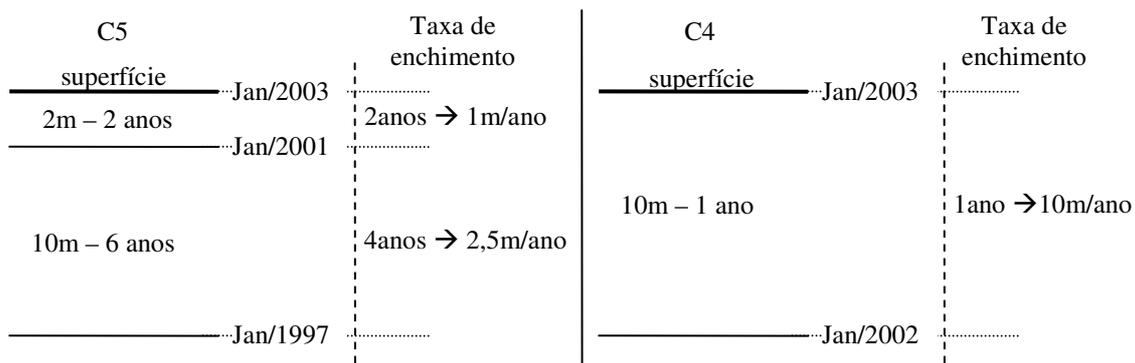


Figura 141 – Estimativa da taxa de enchimento das células investigadas.

$$I_{RSU}(z) = (e_{cs}/te_{cs}) + (z - e_{cs})/te_c \quad \dots(51)$$

em que,

$I_{RSU}(z)$  – idade do resíduo/m (ano);      $e$  – espessura da camada (m);  
 $cs$  – camada superior;      $te$  – taxa de enchimento (m/ano);  
 $c$  – camada em estudo;      $z$  – profundidade de estudo (m)

Por meio da Equação 40 e dos valores de  $G_{ur}$  de ambas as células estudadas, obtiveram-se os pontos do gráfico da Figura 142 onde também foi traçado um ajuste linear para o comportamento.

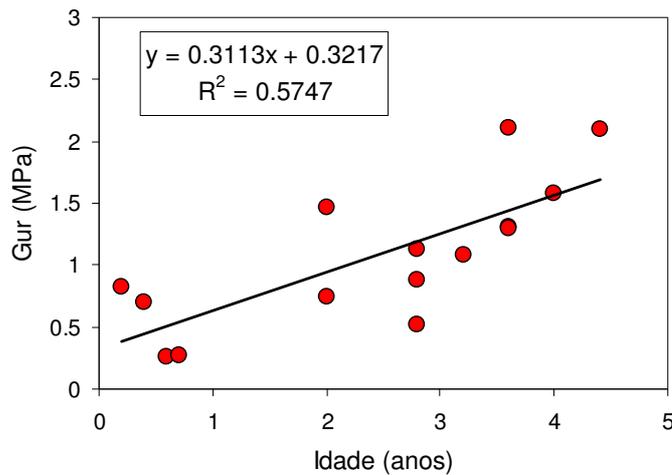


Figura 142 – Efeito da idade do resíduo no módulo cisalhante do ciclo nas células C4 e C5 através de ajuste linear.

A Equação 52 reescreve o ajuste proposto na Figura 142, sendo  $I_r$  a idade do resíduo em anos o que possibilita projetar a evolução de  $G_{ur}$  com a idade e avaliar as Equações 49 e 50.

$$G_{ur} = 0,3113 \cdot I_{RSU} + 0,3217 \quad \dots(52)$$

Sejam, por exemplo, os módulos máximos ( $G_0$ ) apresentados por Carvalho (1999), obtidos em ensaios *cross-hole* no aterro de RSU Bandeirantes (SP) em uma célula cuja idade do resíduo era de 15anos. Tomando-se a curva de variação de  $G_0$ , com peso específico de  $8\text{kN/m}^3$  e profundidade máxima de 10m, pode-se determinar o valor médio de  $G_0$  da ordem de  $9,86\text{MPa}$ . Este valor representa o módulo médio de uma célula com 10m e 15anos de idade, ou seja,  $G_{0(15anos)}$ .

Por outro lado, determinando-se o valor de  $G_{ur(15anos)}$  pela Equação 52 para um resíduo com 15 anos de idade, obtém-se cerca de 4,99MPa. Conseqüentemente, pode-se obter a relação  $G_{ur}/G_0$  para 15 anos, que está representada pela Equação 53.

$$G_{ur} = 0,5060 \cdot G_0 \quad \dots(53)$$

Ora, pode-se, então, obter uma correlação mais precisa entre  $G_{ur}/G_0$  e a idade do resíduo empregando os coeficientes das Equações 49, 50 e 53, sendo representada pelo ajuste exponencial da Figura 143 e reescrita na Equação 54.

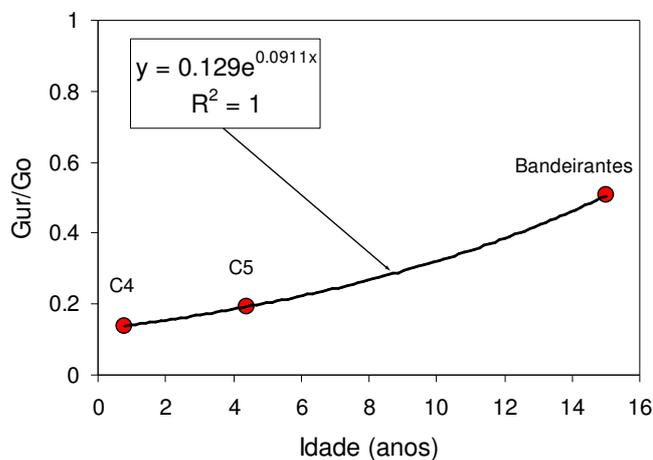


Figura 143 – Variação de  $G_{ur}/G_0$  em função da idade do RSU.

$$G_{ur}/G_0 = 0,129 \cdot e^{0,0911 \cdot I_{RSU}(anos)} \quad \dots(54)$$

A comparação direta da variação de módulos de cisalhamento em profundidade obtidos em campanhas de campo em diferentes aterros de RSU (p.ex. Muribeca x Bandeirantes) não é correta, pois para uma mesma profundidade têm-se diferentes idades de resíduo. Para uniformizar os valores G determinados nos dois aterros, considerou-se uma taxa de enchimento de 1m/ano para o aterro Bandeirantes. Então, com a variação de idade em profundidade e  $G_0$ , do ensaio de cross-hole (Carvalho, 1999), pode-se obter uma estimativa  $G_{ur}$  para o aterro Bandeirantes, por meio da equação 54. Finalmente, a Figura 144 apresenta os resultados comparativos entre os módulos obtidos nos dois aterros,

devidamente uniformizados considerando a idade do resíduo, bem como, a projeção do ajuste proposto com a Equação 41.

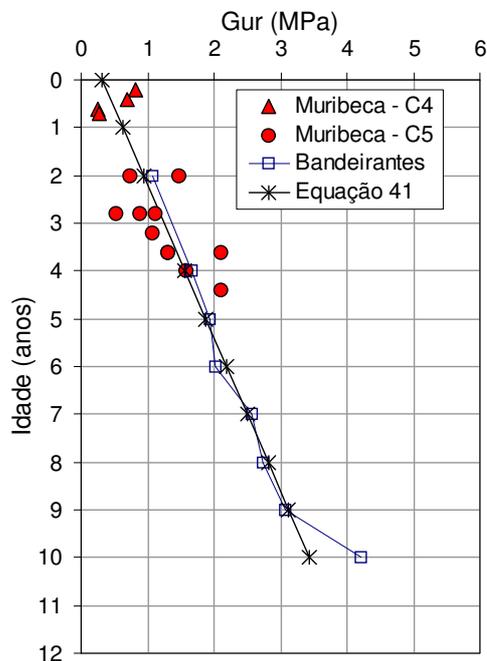


Figura 144 – Comparação entre valores de  $G_{ur}$  obtidos com pressiômetro no aterro da Muribeca e adaptado de ensaios de cross-hole no aterro Bandeirantes.

Nota-se que os resultados parecem estar coerentes entre si mostrando uma relação de aumento com a idade, inclusive se ajustando bem com a Equação 41. Melhor comparação se daria caso tivessem sido realizados ensaios pressiométricos em resíduo com idades mais elevadas. Além disto, cabe ressaltar novamente, que há a necessidade de realização de ensaios geofísicos para determinar o módulo dinâmico nas células investigas do aterro da Muribeca. Entretanto, as correlações propostas parecem estar coerentes e o valor intermediário de 30% usado para deduzir as correlações das Equações 38 e 39 parece, também, ter produzido resultados aceitáveis.

### 6.2.5.

### Tensão Horizontal ( $\sigma_h$ ) e Coeficiente de Empuxo Lateral ( $K_r$ )

#### 6.2.5.1.

#### Metodologia de Análise

Segundo Clarke (1995) a estimativa da tensão horizontal por ensaios pressiométricos em solos é, na melhor das hipóteses, subjetiva pois depende da escolha de um único ponto da curva pressiométrica como referência. Esta, por sua vez, é extremamente suscetível a distúrbios causados pela técnica de instalação da sonda o que faz com que as diversas técnicas empregadas na identificação deste ponto possam se tornar inválidas. Clarke (1997) indica que o PAP é o único tipo de ensaio pressiométrico que pode fornecer diretamente  $\sigma_h$ , enquanto que os PPF e PC devem fazer uso de alguma ferramenta matemática computacional para análise, fornecendo resultados geralmente pouco conclusivos e por isso mesmo este parâmetro não é muitas vezes solicitado em ensaios com estes dois últimos tipos de pressiômetro.

Já foi discutido anteriormente que o tipo de metodologia de instalação da sonda utilizada nas investigações aqui apresentadas produziu uma região altamente amolgada de resíduo (Figura 134), portanto acredita-se que o efeito na identificação do ponto de referência seja ainda maior neste caso, levando a valores de  $\sigma_h$  pouco confiáveis. Todavia, para fins de avaliação do equipamento desenvolvido será empregada a metodologia proposta por Marsland & Randolph (1977) que foi desenvolvida com base no trecho inicial de carregamento de ensaios com PPF em argilas rijas e tomando como base a resistência ao cisalhamento de pico e pressão de escoamento. Segundo Clarke (1995), este método também pode ser empregado com PAP e, considerando que nos ensaios realizados no aterro da Muribeca obtiveram-se curvas similares a PAP, tentar-se-á adaptar esta metodologia para interpretação dos mesmos.

A proposta é um método interativo que se apóia na premissa amplamente apresentada na literatura técnica de que o ponto de início do escoamento ( $p_y$  – *onset of yielding*) em argilas rijas é igual à soma de  $\sigma_h$  e  $S_u$ , sendo identificado por uma acentuada mudança na inclinação da curva. Segundo Marsland & Randolph (1977) a resistência ao cisalhamento de pico pode ser obtidas conforme a Equação 55 calculada para a inclinação máxima da curva pressiométrica retraçada em

escala  $p \times \ln(\Delta V/V)$ . Contudo, dado o acréscimo de resistência devido ao efeito de reforço por fibras observados nas curvas pressiométricas, a determinação da resistência segundo a maior inclinação da curva provê valores superestimados. Por outro lado, Hawkins *et al.* (1990) recomendam que as curvas pressiométricas e as de resistência ao cisalhamento sejam mutuamente consistentes antes do início do escoamento. Na prática isto é alcançado quando se emprega simplesmente o ponto de escoamento como referência na determinação da correspondente resistência ao cisalhamento na curva  $p \times \ln(\Delta V/V)$ , igualando-se a diferença  $p_y - \sigma_h$  neste ponto.

$$\tau = \frac{dp}{d[\ln \Delta V/V]} \quad \dots(55)$$

O procedimento iterativo segue os seguintes passos:

- i. Estima-se um valor inicial de  $\sigma_h$ , por exemplo a partir de um valor de  $K_0$  conhecido;
- ii. Com este valor, determina-se a respectiva deformação de cavidade de referência ( $\epsilon_{c0}$ ) na curva teste;
- iii. As novas deformações corrigidas ( $\epsilon_{corr}$ ) são calculadas para o novo diâmetro da cavidade segundo a Equação 56, onde  $\epsilon_{c0}$  é a deformação de cavidade de referência no valor selecionado de  $\sigma_h$  e  $\epsilon_{c0}$  é a deformação de cavidade medida no ensaio;

$$\epsilon_{corr} = \frac{\epsilon_c - \epsilon_{c0}}{1 + \epsilon_{c0}} \quad \dots(56)$$

- iv. A resistência ao cisalhamento correspondente a  $p_y$  é obtida da inclinação da curva  $p \times \ln(\Delta V/V)$ , onde a correlação entre  $\epsilon_c$  e  $\Delta V/V$  é dada pela Equação 57 (Clarke, 1995);

$$\frac{\Delta V}{V} = 1 - \frac{1}{(1 + \epsilon_c)^2} \quad \dots(57)$$

- v. Um novo valor de  $\sigma_h$  é obtido segundo a Equação 58;

$$\sigma_{h2} = p_y - \frac{dp}{d[\ln(\Delta V/V)]} \quad \dots(58)$$

- vi. Se este valor coincidir com a estimativa inicial, então a tensão horizontal foi escolhida corretamente;
- vii. Caso contrário repetem-se as etapas a partir do item (ii) até haver convergência para a equação 58.

A metodologia para o caso de materiais e puramente friccionais (análises drenadas) é similar porem empregada a correlação  $p_y = \sigma_h(1+\text{sen}(\phi))$  deduzida com base na teoria da plasticidade. Neste caso estima-se o ângulo de atrito de pico conforme proposta de Hughes *et al.* (1977), referente à inclinação máxima da curva  $\ln p' \times \ln(\epsilon_c)$ . Similar ao anterior, dadas as características peculiares das curvas observadas o ângulo pode ser superestimado ou de impossível obtenção.

As limitações desta metodologia associada aos ensaios realizados estão relacionadas às considerações feitas no item 6.2.3 anteriormente, especialmente no que se refere à identificação do ponto  $p_y$ . Na prática, elas podem implicar em valores subestimados deste ponto e, portanto, de valores igualmente inferiores de resistência ao cisalhamento e de tensão horizontal.

Além disto, resíduo não é solo. Portanto, qualquer metodologia de interpretação de ensaios de campo originalmente concebida para solos deve ser empregada com restrição em análises com RSU e extrema cautela em aplicações práticas.

Nesta pesquisa estas metodologias serão empregadas a seguir meramente como exercícios teóricos, cabendo ainda mais estudos a respeito do assunto.

#### **6.2.5.2. Variação de $\sigma_h$ em Profundidade**

A variação de  $\sigma_h$  com a profundidade, determinada para cada ponto estudado, está apresentada na Figura 145 onde é possível perceber que, com exceção de dois pontos do furo PMT1 nas profundidades de 6m e 8m onde se suspeitava haver ocorrido danos na membrana durante o ensaio, os valores de  $\sigma_h$  tendem a aumentar em profundidade segundo o ajuste linear sugerido no mesmo gráfico, o que demonstra que a estimativa da magnitude de  $\sigma_h$  pode ser relevante no projeto de estruturas construídas dentro do aterro e submetidas a esforços laterais como drenos verticais ou muros de contenção.

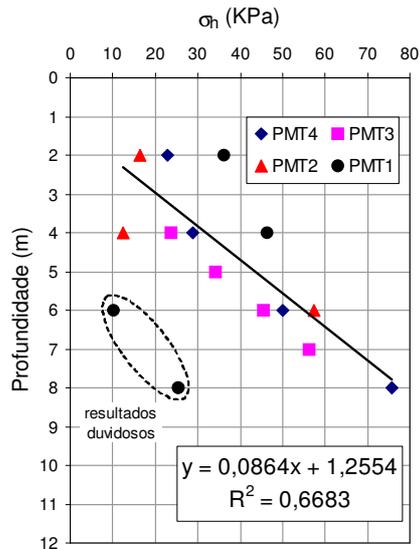


Figura 145 – Tensão horizontal obtida nos ensaios pressiométricos.

### 6.2.5.3. Coeficiente de Empuxo Lateral

A tensão vertical no interior das células é, dentre outros fatores, função do peso específico ( $\gamma_r$ ) das camadas sobrejacentes que, por sua vez, pode variar com a idade do resíduo. Para considerar este efeito propôs-se a estimativa de  $\gamma_r$  segundo a equação apresentada por Azevedo *et al.* (2003), que está transcrita na Equação 54, e que fornece a variação do peso específico de um resíduo em função do tempo (decomposição). Então, com esta equação, com a estimativa da idade do resíduo em profundidade obtida segundo os pressupostos apresentados na Figura 141 e com a espessura da camada acima do ponto investigado foi possível calcular a respectiva tensão vertical e conseqüentemente calcular o coeficiente de empuxo lateral do resíduo. Foi considerada, também, uma camada de cobertura com 0.5m com peso específico de 20kN/m<sup>3</sup>. Cabe ressaltar que a Equação 59 produz resultados de  $\gamma_r$  para resíduos antigos bastante elevados e, portanto, pode superestimar  $\sigma_v$ .

$$\gamma_r (kN/m^3) = 0,069 \cdot t(meses) + 8,17 \quad \dots(59)$$

O gráfico (a) da Figura 146 ilustra a comparação dos valores das tensões verticais e tensões horizontais obtidas com as duas metodologias. Com isto é

possível inferir que em quase todas as profundidades investigadas o resíduo estava submetido a um estado de tensões cujos valores de tensão vertical eram maiores do que os de tensão horizontal, similar ao que ocorre com solos normalmente adensados. Pode-se apenas especular que a origem destes valores para o resíduo esteja associada à falta de compactação mecânica durante a disposição nas células ou ainda devido ao processo de perda de massa durante a decomposição.

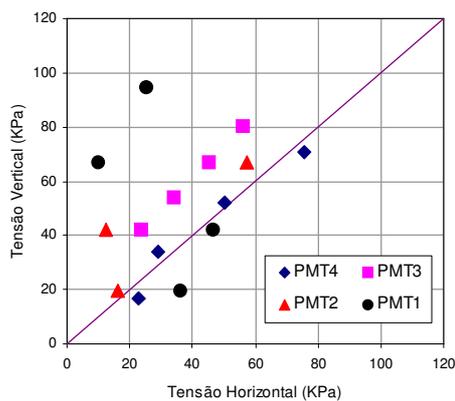


Figura 146 – Tensões verticais e horizontais nas células investigadas.

Com a estimativa de  $\sigma_v$  e  $\sigma_h$  pôde-se determinar o coeficiente de empuxo lateral do resíduo ( $K_R$ ) que certamente não representa mais a condição inicial devido às trajetórias de tensões impostas durante a instalação da sonda. Os resultados estão ilustrados na Figura 147 juntamente com os dados apresentados por Dixon & Jones (1998) obtidos com um PAP (*Camkometer*) em RSU. Nesta figura percebe-se que, similar aos resultados de Dixon & Jones (1998), ocorre dispersão nos valores de  $K_R$  o que dificulta o estabelecimento de um padrão de comportamento generalizado. Entretanto, analisando-se os dados individualmente por furo é factível observar uma leve tendência de acréscimo de  $K_R$  em profundidade a partir dos 4m nos ensaios PMT4, PMT3 e PMT2.

Acredita-se que o aumento de  $K_R$  em profundidade, mesmo que em pequena magnitude, esteja correlacionado com perda de massa nas células provocado pelo envelhecimento do resíduo. O efeito da variação de idade do resíduo das células em profundidade está representada nos gráficos da Figura 148, onde estão mostradas as variações de  $K_r$  e  $\sigma_h$  com a idade (em profundidade) das células investigadas. Este comportamento pode ser associado à diminuição do percentual

de alguns materiais fibrosos compostáveis como fibras de coco, tecidos, piaçava, madeira, dentre outros. A influencia da diminuição dos materiais fibrosos degradáveis no aumento dos valores de  $K_r$ , já tem sido reportado por Landva *et al.* (2000) por meio de estudo laboratorial em resíduo preparado submetido à compressão unidimensional, com medida de tensão lateral. A faixa de  $K_r$  proposta por Landva *et al.* (2000) para um resíduo com percentual baixo de fibras degradáveis (8% - 14%) foi de 0,47 a 0,49. Os valores máximos e mínimos obtidos nesta pesquisa foram de 0,14 e 1,46 respectivamente, enquanto que os apresentados por Dixon & Jones (1998) foram de 0,13 e 0,91. A variação média de  $K_r$  em profundidade nesta pesquisa (Figura 147) foi da ordem de 0,60

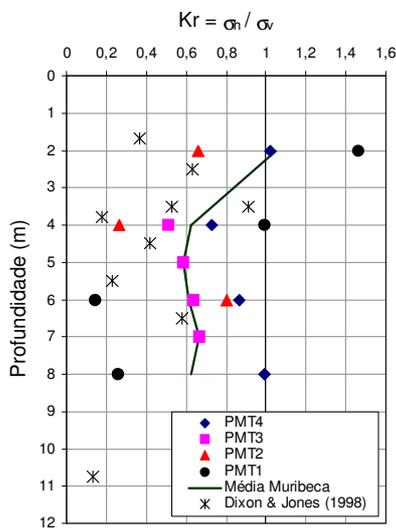


Figura 147 – Variação do coeficiente de empuxo do resíduo ( $K_r$ ) com a profundidade.

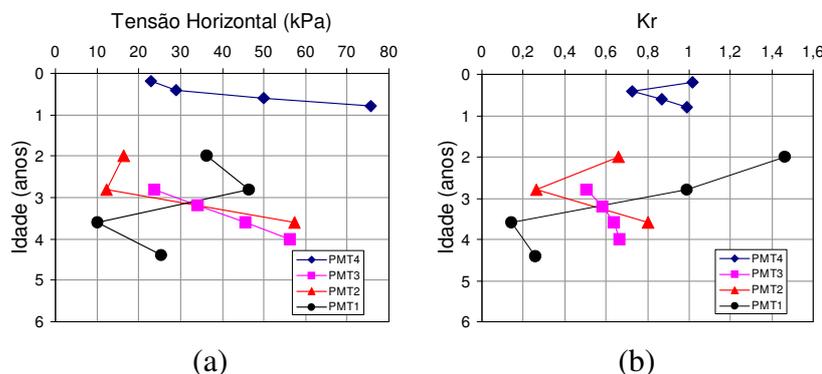


Figura 148 – Efeito da idade do resíduo na variação de  $K_r$  calculado.

### 6.3. Ensaio SPT

As sondagens SPT na célula C5 (Figura 109(a)) mostram que os resultados obtidos apresentam certo comportamento similar entre si quando se excluem alguns picos de elevada resistência à penetração ( $N > 17$ ) oriundos da ocorrência de elementos com rigidez mais elevada (pedras, madeiras, pneus, etc.). Na C5 a quantidade de golpes esteve em uma faixa de 4 a 18, porém não foi possível produzir um padrão geral de aumento da resistência à penetração com a profundidade. Por sua vez, na célula C4 (Figura 109(b)) os resultados de  $N$  foram bem mais consistentes e quase constantes com a profundidade salvo os casos de pico excludentes.

A faixa observada de valores de  $N$  está de acordo com o que é geralmente reportada na literatura (e.g. Sowers, 1968, Singh & Murphy, 1990; Sanchez-Alciturri, 1993, Carvalho 1999) e especialmente coerente com o que já foi determinado em outras campanhas do gênero no aterro da Muribeca (e.g. Jucá *et al.*, 1999; Jucá, 2003; Monteiro, 2003).

Os valores médios de resistência à penetração ( $N_{med}$ ) em cada furo de sondagem, desconsiderando picos de resistência elevada, foram determinados e estão descritos na Figura 149. Na célula C5 (< 6 anos)  $N_{med}$  esteve na faixa entre 7 e 10, enquanto que na célula C4 (< 1 ano) o valor médio foi de 6.

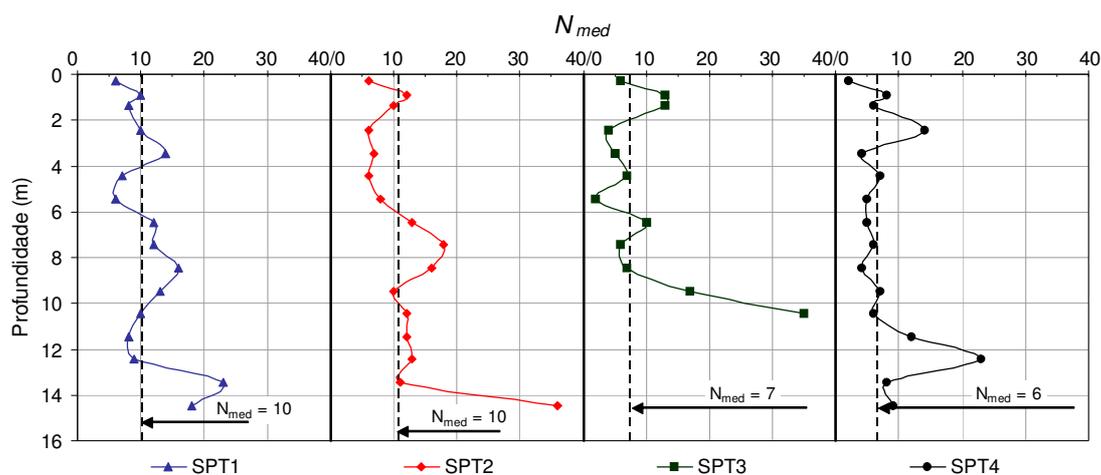


Figura 149 – Valores médios de  $N_{spt}$  nas células investigadas.

Sabe-se que a determinação de parâmetros de resistência de RSU a partir de resultados de SPT não é o procedimento usual dada a grande incerteza associada ao número de golpes (Manassero *et al.*, 1996), não existindo ainda propostas de correlações específicas para o caso. Todavia, pode-se tentar obter uma estimativa qualitativa do ângulo de atrito ( $\phi$ ) do RSU por meio do emprego de correlações originalmente produzidas para solos como por exemplo a apresentada por Décourt (1989, 1991) relativa a SPT com 60% de eficiência (Figura 150). Os valores de  $\phi$  foram obtidos segundo a curva proposta fornecendo valores médios (Figura 151) de  $\phi=31,5^\circ$  a  $35,9^\circ$  para a C5 e  $\phi=30,4^\circ$  para a C4.

Apesar da adaptação, os valores de ângulo de atrito parecem ter boa concordância com o que se tem observado na literatura para RSU com idades similares e descritos anteriormente no Capítulo 3 desta pesquisa.

Além disto, notou-se que o ângulo de atrito da célula C4 (com lixo novo) apresentou um valor médio ligeiramente inferior ao obtido na célula C5, onde o processo de degradação é mais acentuado.

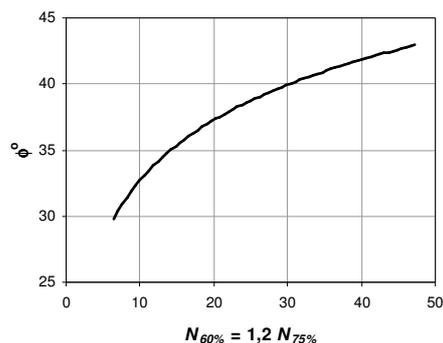


Figura 150 – Correlação entre  $N_{spt(60\%)}$  e  $\phi$  segundo Décourt (1991) para solos.

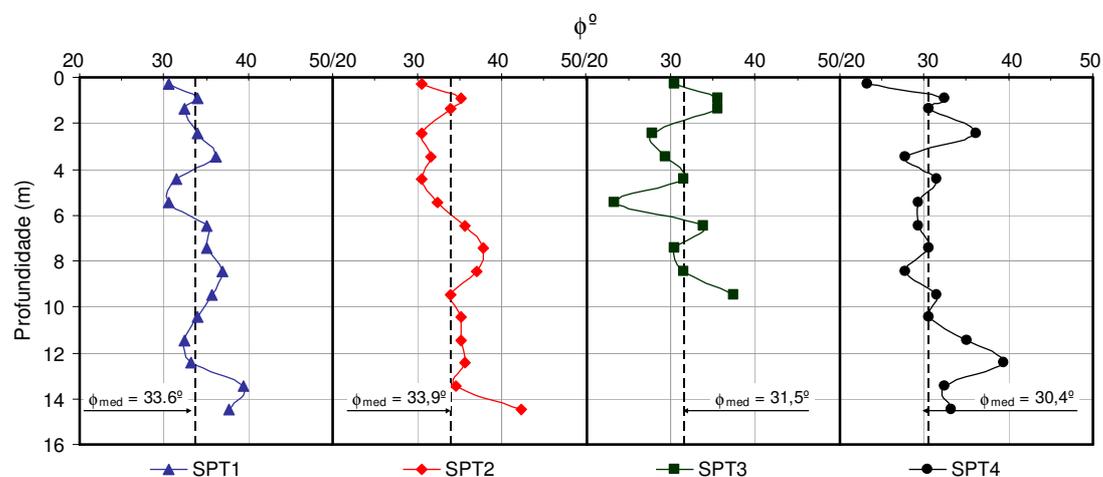


Figura 151 – Ângulo de atrito do RSU calculado segundo correlação proposta para  $N_{spt}$  de solos.

#### 6.4. Ensaio CPT

Todos os três ensaios de CPT realizados na célula C5 (Figura 110 (a)) mostraram picos elevados de resistência de ponta e quedas bruscas (CPT1) indicando a heterogeneidade do meio. Por sua vez os valores de  $q_c$  na célula C4 (Figura 110 (b)) foram inferiores aos observados na C5 e com menos picos, indicando uma possível correlação entre degradação e resistência. Em ambas as células um comportamento de acréscimo de  $q_c$  em profundidade foi observado, sendo mais expressivo na célula mais antiga. Para avaliar este comportamento, curvas de ajuste exponenciais foram traçadas considerando individualmente o furo, cada célula e ambas, e os resultados estão ilustrados na Figura 152.

No caso de solos granulares, uma análise da variação do ângulo de atrito com a profundidade a partir da resistência de ponta do cone pode ser feita de acordo com correlações obtidas em ensaios com areais em câmaras de calibração (Robertson & Campanella, 1993; Jamiolkowski *et al.*, 1985; Baldi *et al.*, 1986). Na maioria destes casos, tem-se uma correlação para a determinação da densidade relativa ( $D_r$ ) como a proposta por Lancellotta (1985) e transcrita na Equação 60. Em seguida, a transformação de  $D_r$  em  $\phi$  pode ser feita segundo propostas de interpretação de SPT como a apresentada por de Mello (1971) e reescrita na Equação 61.

$$D_r = -98 + 66 \log \frac{q_c}{(\sigma'_v)^{0.5}} \quad \dots(60)$$

$$(1,49 - D_r \cdot \tan(\phi)) = 0,712 \quad \dots(61)$$

As equações acima descritas foram empregadas no contexto de RSU meramente com um estudo qualitativo, cabendo ressaltar as diferenças conceituais entre os dois materiais. Como os ensaios de cone mecânico não fornecem o valor de poropressão em profundidade, empregou-se o valor da tensão vertical total na Equação 60 obtida com o peso específico calculado segundo Azevedo *et al.* (2003). Os resultados obtidos com esta adaptação estão ilustrados na Figura 153 juntamente com o valor médio de ângulo de atrito por furo.

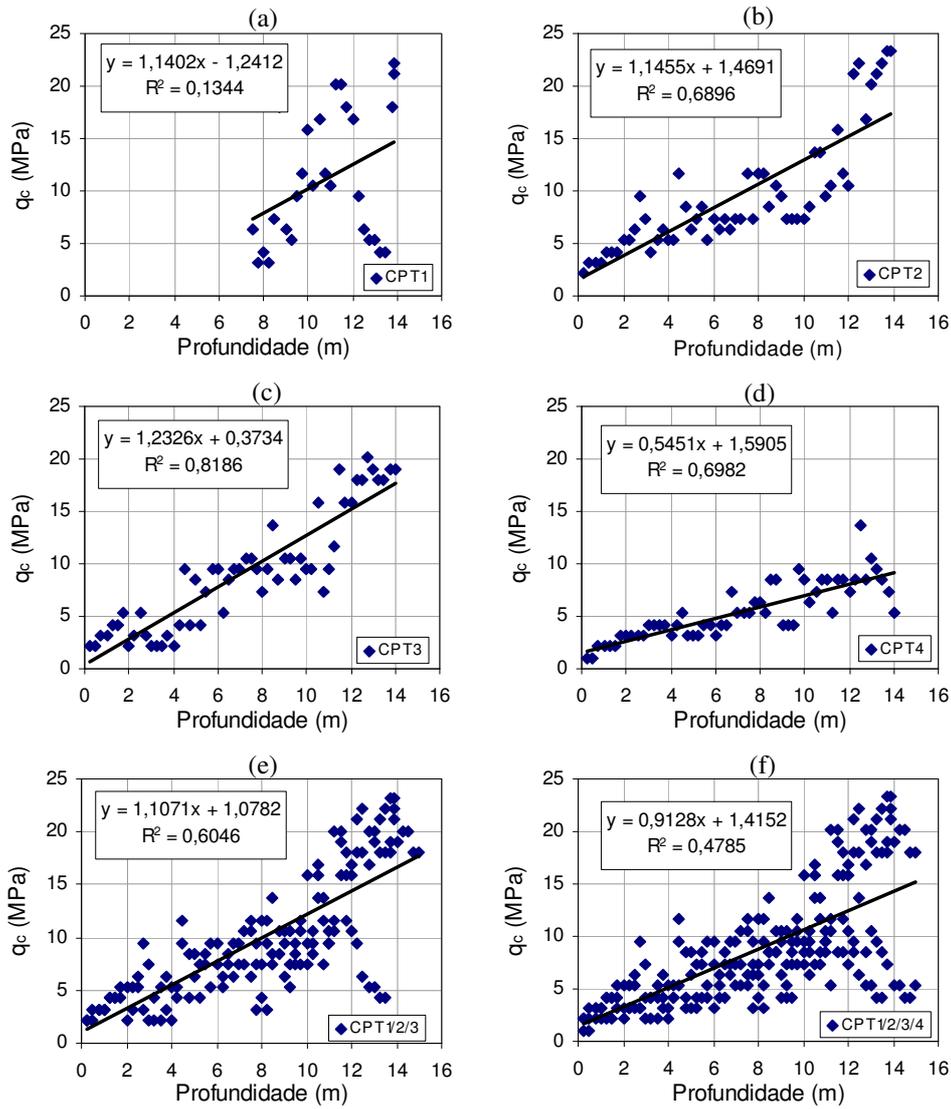


Figura 152 – Curvas de ajuste da variação de  $q_c$  com profundidade nos ensaios CPT.

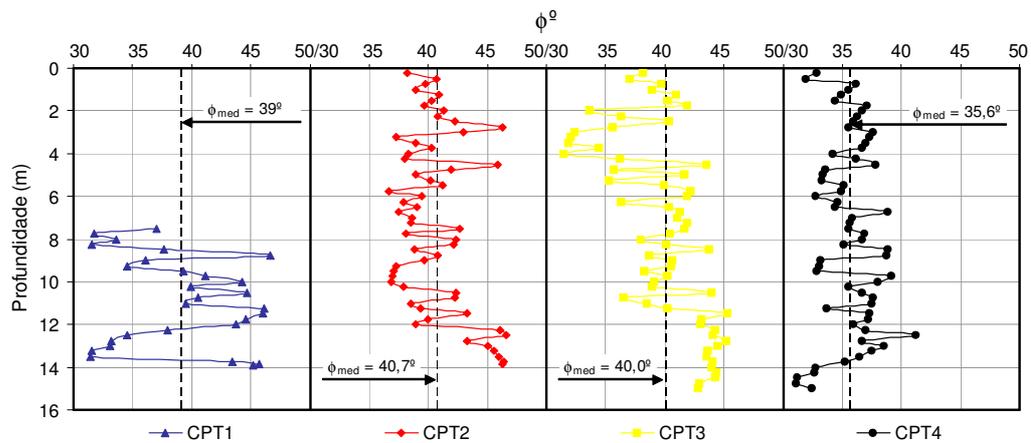


Figura 153 – Resultados na análise da variação de  $\phi$  em profundidade nos ensaios CPT.

Os valores de ângulo de atrito determinados com os ensaios de CPT e com base nas equações originalmente concebidas para solos, foram ligeiramente superiores àqueles obtidos nas análises adaptadas empregando resultados do SPT, porém também de acordo com os valores reportados na literatura em análises com resíduo de idade similar e descritos no Capítulo 3. Similarmente, o resultado médio da célula C4 foi ligeiramente inferior ao da C5, sugerindo correlação entre degradação e ângulo de atrito.

## 6.5.

### Ensaio Laboratoriais – Teor de Umidade e de Sólidos Voláteis

De acordo com Palmisano & Barlaz (1996) uma faixa de 20% a 40% de teor de umidade nas células de RSU é o percentual ótimo para a indução de processos anaeróbios de decomposição orgânica, podendo propiciar a proliferação de microorganismos e promover o transporte de nutrientes dentro da célula, aumentando a degradação. Teores de umidade inferiores ou superiores a estes patamares podem ser inibitórios dos processos anaeróbios de decomposição da matéria orgânica nas células, pois a maioria das reações bioquímicas nas células somente ocorre em presença de água (Monteiro, 2003).

A Figura 154 mostra que os teores de umidade das amostras coletadas na célula C5 apresentam-se dentro da faixa de percentual ideal para a decomposição anaeróbia sugerida por Palmisano & Barlaz (1996), isto, entre 20% e 40%. Os valores médios de %w nos furos SPT 1, 2 e 3 (células C5) até a profundidade investigada foram de 31,8%, 31,18% e 22,6%, respectivamente.

Por outro lado, os teores de sólidos voláteis encontrados na célula C5 foram baixos e praticamente inalterados com a profundidade, indicando que nesta célula a matéria orgânica (%MO≈60% in natura na Muribeca) já foi bastante degradada até a profundidade investigada. Os valores médios de %SV nos furos SPT 1, 2 e 3 (células C5) até a profundidade investigada foram de 9,5%, 8,68% e 5,3%, respectivamente.

A Figura 154 mostra, também, que os teores de umidade na célula C4 estiveram bastante elevados na camada superficial da célula (até 4m), decaindo em seguida até a profundidade de 6m e crescendo novamente a partir dos 9m. Na maioria dos casos, o teor de umidade esteve fora da faixa ideal dos processos de

decomposição, com valores superiores a 40%. Sabe-se que o teor de umidade pode ser função, dentre outros fatores, da história do aterro, da capacidade de campo e do balanço hídrico local. Entretanto, considerando o elevado e atípico índice pluviométrico ocorrido durante a campanha de ensaios, especula-se que o teor de umidade elevado pode ser justificado pela infiltração de água através do topo da célula, considerando que a C4 não possuía cobertura impermeável. O valor médio de %w no furo SPT4 (célula C4) até a profundidade investigada foi de 47,9%.

Por sua vez, os teores de sólidos voláteis determinados na célula C4 apresentaram uma tendência de variação similar ao descrito na curva de %w, mostrando valores elevados em camadas mais superficiais, indicando que a matéria orgânica de constituição ainda não foi totalmente degradada, especialmente até a profundidade de 4m. O valor médio de %SV no furo SPT4 (célula C5) até a profundidade investigada foi de 21,3%.

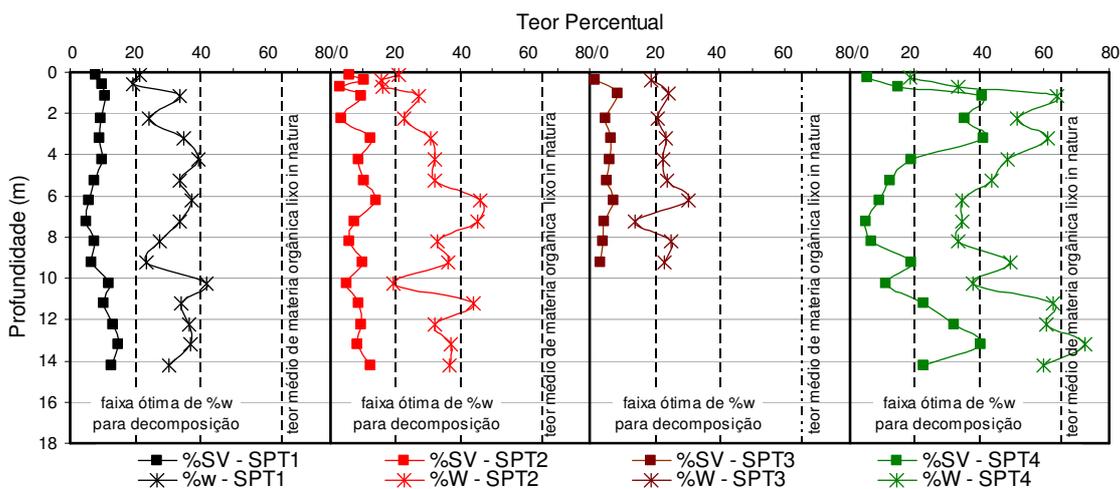


Figura 154 – Variação dos teores de umidade e de sólidos voláteis nas células C4 e C5

## 6.6.

### Algumas Análises Comparativas entre Ensaios

#### 6.6.1.

##### Correlações entre $G_{ur}$ , $q_c$ e $N_{spt}$

As relações entre os valores de módulo cisalhante dos ciclos ( $G_{ur}$ ) e a resistência de ponta do cone ( $q_c$ ) e a resistência à cravação do SPT dos resultados

encontrados nas células C4 e C5 estão ilustradas nas Figura 155 a 157. Os valores de  $G_{ur}$  e  $q_c$  são dados em MPa.

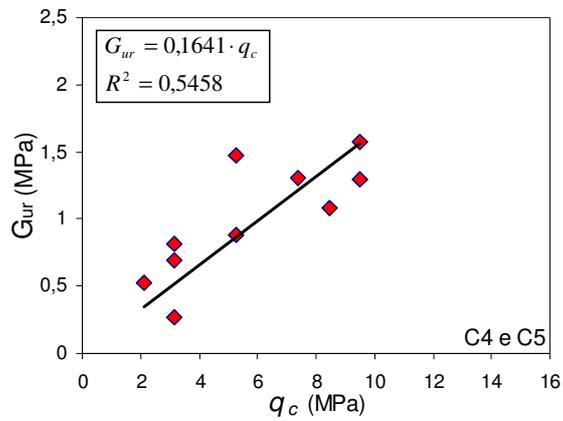


Figura 155 –Correlação entre  $G_{ur}$  x  $q_c$  nas células C4 e C5.

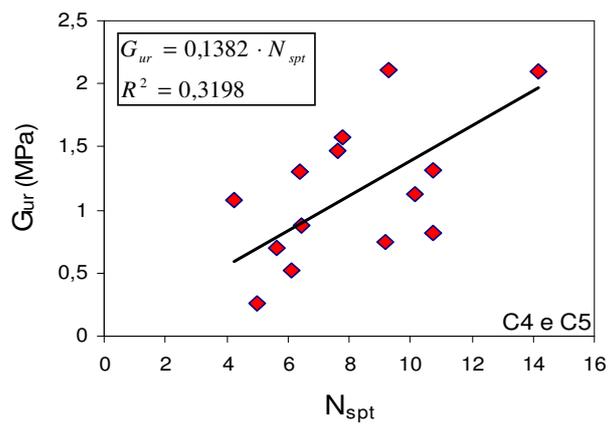


Figura 156 – Correlação entre  $G_{ur}$  x  $N_{spt}$  nas células C4 e C5.

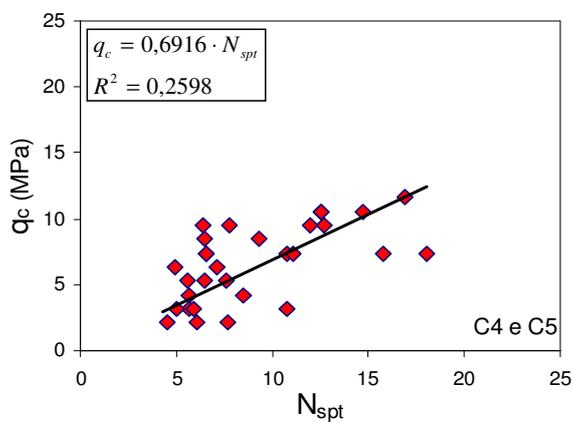


Figura 157 – Correlação entre  $q_c$  e  $N_{spt}$  nas células C4 e C5.

### 6.6.2. Avaliação do efeito de %SV e %w<sub>r</sub> em G<sub>ur</sub>

A correlação entre teor de umidade e de sólidos voláteis nas células investigadas é clara e está representada por meio do ajuste exponencial da Figura 158, onde estão os dados das quatro sondagens.

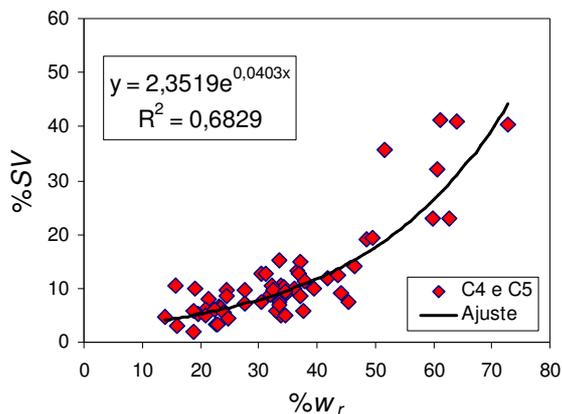


Figura 158 – Correlação entre %w e %SV em ambas células investigas.

Entretanto, a obtenção de uma correlação precisa entre os módulos cisalhantes e os teores de sólidos voláteis nas células investigadas não foi possível, considerando que a maioria dos dados amostrais de %SV representavam um resíduo já bastante degradado e com pequena variação (célula C5), e que a quantidade de informações na célula C4 foi pequena, portanto pouca representatividade. Mesmo assim, tentou-se representar os resultados obtidos por meio da Figura 159, onde estão traçados os módulos cisalhantes contra os teores de sólidos voláteis normalizados para a porcentagem de matéria orgânica no aterro da Muribeca (60%), individualmente e em ambas as células investigadas. Por meio da Figura 159(a), percebe-se que não há uma tendência clara de correlação entre G e %SV na célula C5. O ajuste obtido não foi bom, sendo representado pelo valor baixo de  $R^2$ , porém indica o decréscimo de  $G_{ur}$  com o aumento do %SV. Por sua vez, o módulo cisalhante na C4 apresenta um aumento com acréscimo de %SV (Figura 159(b)), porém os dados são poucos para fornecer conclusões confiáveis. Por outro lado, quando se representam os resultados obtidos em ambas as células em um único gráfico (Figura 159(c)) até a profundidade investigada (8m), estes podem ser ajustados por uma equação logarítmica

mostrando uma tendência de aumento do módulo cisalhante para uma diminuição do teor de sólidos voláteis, isto é, o resíduo mais degradado apresenta maior rigidez.

Considerando a correlação entre %w e %SV descrita na Figura 158, é de se esperar que o comportamento  $\%w_r \times G_{ur}$  seja similar ao descrito anteriormente com relação à %SV x  $G_{ur}$ . De fato, uma correlação clara entre os dois parâmetros também não foi viável como é possível notar através da Figura 160, onde estão apresentados as variações destes dois parâmetros nas células C5 (Figura 160 (a)), C4 (Figura 160 (b)) e considerando os resultados de ambas as células (Figura 160 (c)). A análise crítica leva à crer que dificilmente pode-se ter um ajuste confiável, contudo a Figura 160(c) pode levar a crer que  $G_{ur}$  decresce com o aumento do %w, similar ao sugerido pela Figura 159 (c).

As hipóteses levantadas sobre correlações entre G,  $\%w_r$  e %SV demonstraram que o estudo não foi conclusivo. Portanto as correlações sugeridas não devem ser empregadas em aplicações praticas sem que se utilizem mais dados sobre diferentes teores de %w e %SV.

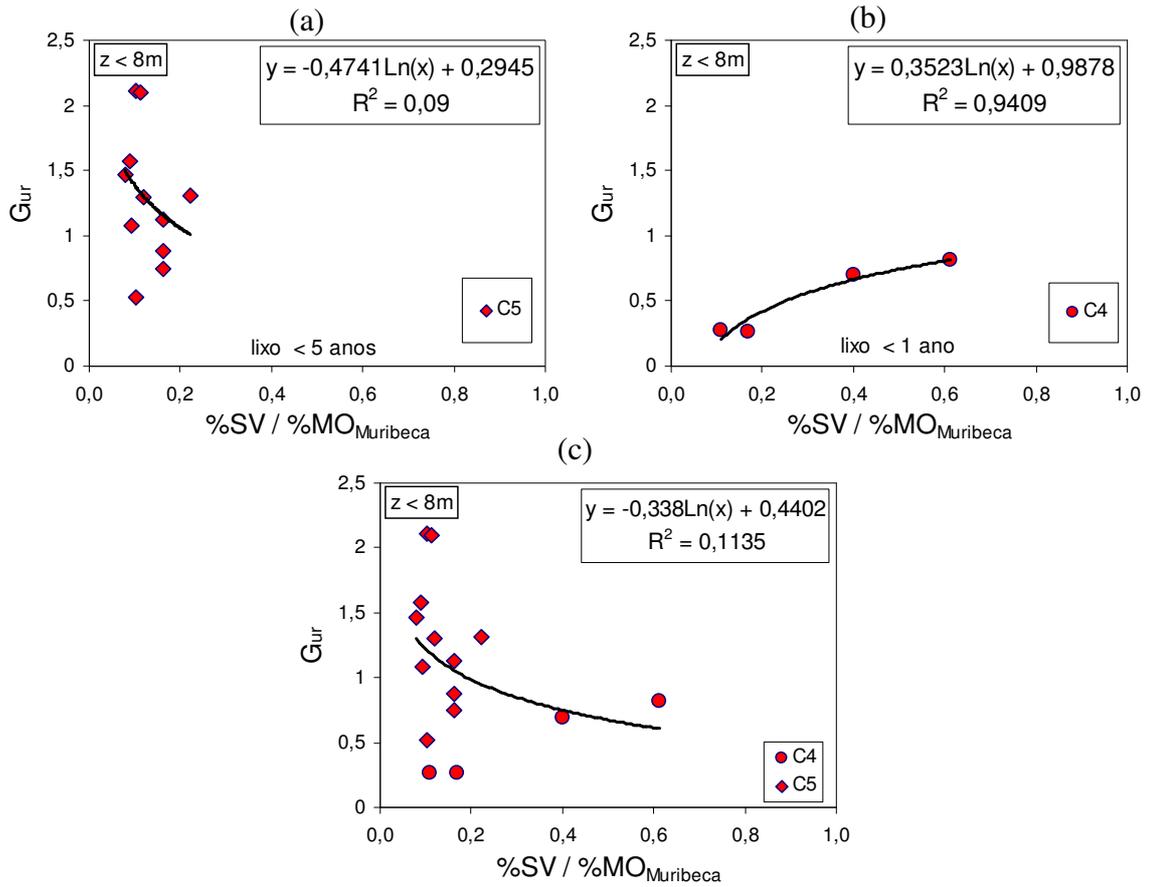


Figura 159 – Influência do %SV na variação dos módulos cisalhantes dos ciclo.

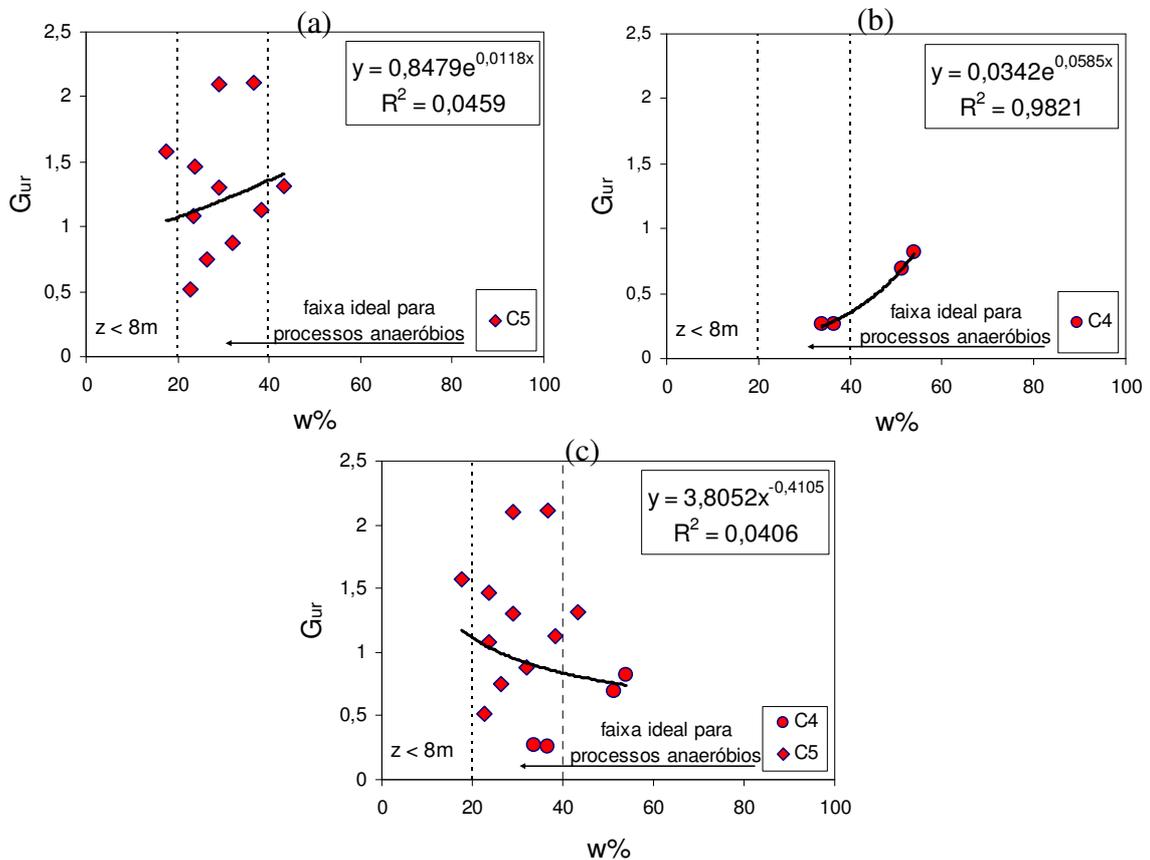


Figura 160 – Influência do %SV na variação dos módulos cisalhantes dos ciclo.

## **7**

### **Conclusões e Sugestões**

Os objetivos propostos nesta pesquisa foram alcançados primeiramente com o desenvolvimento de duas sondas pressiométricas de cravação direta, com célula única e instrumentação eletrônica por meio de sensores do tipo Hall em até quatro pontos ortogonais ao longo do comprimento da zona expansível de membrana, e posteriormente pela aplicação prática das sondas em um aterro de disposição de resíduos sólidos para determinação de parâmetros de deformabilidade.

A análise final do estudo desenvolvido nesta pesquisa será dividida conforme três aspectos básicos relacionados aos objetivos propostos: (i) desenvolvimento do equipamento; (ii) aplicação prática e (iii) interpretação de parâmetros. Em seguida serão apresentadas algumas sugestões de continuidade da pesquisa.

#### **7.1.**

##### **Desenvolvimento do Equipamento**

###### **(i) Ranhuras Externas da Sonda**

As ranhuras externas transversais ao corpo da sonda, projetadas para distribuir melhor o gás pressurizado, dificultaram bastante a colocação das membranas, seja pela quantidade ou pela profundidade destas.

###### **(ii) Sistema de Medição de Deslocamentos: Braços Móveis**

O sistema com braços móveis projetados para acompanhar, via contato físico, a expansão ou contração da membrana durante o ensaio pressiométrico teve êxito no seu propósito que foi possibilitar a instrumentação de deformações da cavidade até níveis superiores do que o convencional em equipamentos do gênero comercialmente disponíveis na atualidade.

O projeto do sistema de fixação da membrana fez com que os braços localizados mais próximos das extremidades da zona teste (topo e base) tivessem a sua abertura máxima influenciada pelas restrições de fixação

### **(iii) Sistema de Medição de Deslocamentos: Sensores de Efeito Hall**

A construção do sistema de medição de deslocamentos radiais empregando sensores do tipo Hall foi uma solução de baixo custo e eficiente ao emprego de transdutores de deslocamentos comercialmente existentes. O arranjo geométrico projetado para os imãs e o chip eletrônico mostrou, em calibrações, que a saída de sinais proporcionais ao movimento de rotação dos braços pôde ser bem ajustada através de um polinômio de segundo grau. Além disto, os resultados obtidos com estas calibrações mostraram pouca histerese e boa repetibilidade.

Por outro lado, a saída de sinal do sensor já com o devido condicionamento eletrônico mostrou dificuldade de estabilização para uma condição estática do braço de medição, por exemplo, ao início de um ensaio, demandando ajustes nos potenciômetros da caixa eletrônica de condicionamento e perda de tempo. Acredita-se que isto se deva a necessidade de estabilização térmica do próprio chip, independente do ambiente que a sonda esteja inserida.

A escolha do uso de pequenas peças de acrílico nas quais os sensores Hall foram colados não foi satisfatória, pois estas peças algumas vezes sofriam trincas causadas pelo aperto do parafuso de fixação, danificando-as. Além disto, na abertura total dos braços de fixação estes tocavam as placas de acrílico com suas partes posteriores que, dependendo da velocidade de abertura, causavam quebra do acrílico, demandando um espaçador de proteção.

### **(iv) Membranas: colocação e desempenho**

A colocação das membranas nas sondas pressiométricas foi realizada várias vezes ao longo desta pesquisa e algumas metodologias foram testadas, porém todas implicaram em perda demasiada de tempo e energia, além de terem sido realizadas somente em laboratório.

O uso de estopa para a limpeza interna das membranas não é indicado, pois deixa resíduos de fios aumentando o atrito na colocação, nem tampouco se deve

empregar óleo mineral ou sintético para este fim. A prática mostrou que se deve utilizar apenas vaselina em pasta com auxílio de esponja.

As membranas com duas camadas de reforço de fibras de nylon e reforço externo com tecido apresentaram rigidez longitudinal extremamente elevada, impossibilitando a expansão destas em função das restrições de movimento impostas nas extremidades de fixação. Não sendo indicado o emprego destas com o equipamento desenvolvido.

Por outro lado, as membranas com uma camada de fibras permitiram a expansão radial, porém os limites de ruptura observados estiveram muito aquém do desejado e da capacidade máxima do sistema de medição de deslocamentos projetado. A rigidez para expansão inicial deste tipo de membrana foi baixa e a rigidez na expansão apresentou claramente dois trechos de inclinações diferenciadas: o primeiro referente à rigidez da borracha, e o segundo oriundo do reforço de fibras. Contudo, obteve-se um bom ajuste com polinômio de terceiro grau para ajustar as curvas de calibração na expansão e na contração, independentemente. Em todos os casos notou-se ocorrência de pequena histerese.

Estas membranas não apresentaram desempenho satisfatório nas investigações de campo em função do reduzido limite de expansão e, principalmente, devido ao fato de seu reforço externo não ser suficiente para resistir aos esforços de cravação e expansão no ambiente do aterro de resíduos. Ficou evidente nas observações de campo que o reforço externo da membrana dos pressiômetros deve ser mais robusto do que o utilizado nesta pesquisa, em investigações com RSU. Acredita-se que um sistema similar ao das lanternas chinesas, com lâminas metálicas flexíveis, possa ser empregado para este fim.

#### **(v) Demais Elementos de Instrumentação da Sonda**

Os estudos a respeito do desempenho do transdutor de pressão localizado na caixa de controle em superfície mostraram que há necessidade de alguns segundos para equalização da diferença nos valores de pressões aplicadas na caixa e lidas no pressiômetro. O estudo demonstrou que a localização ideal para o transdutor de pressão é dentro da sonda pressiométrica, pois mede a pressão efetivamente aplicada.

O sensor de temperatura com circuito integrado adaptado nas sondas serviu apenas para avaliar a temperatura interna nas mesmas e para averiguar o efeito no comportamento nos sensores de deslocamento. Os resultados das calibrações mostraram que a resposta do sensor a variação de temperatura não é tão instantânea como a de um termopar, porém foi possível obter ajustes lineares de calibração.

#### **(vi) Caixa e Painel de Controle**

A caixa de controle foi construída com material leve para facilitar o transporte, porém não se mostrou robusta suficiente para atividades de campo sendo danificada externamente.

O painel de controle que compõe a caixa se mostrou suficiente para realizar ensaios com pressão controlada empregando a válvula de menor capacidade. Porém para ensaios com deformação controlada (ou de deslocamento controlado) há necessidade de construir uma unidade servo-controlada, via hardware ou computador para monitorar os deslocamentos médios dos sensores (Het) e comparar com uma taxa pré-estabelecida de deslocamentos radiais. No caso, se a taxa durante a expansão for menor do que a requerida então uma válvula do tipo solenóide é aberta permitindo a passagem do gás pressurizado para o pressiômetro. Caso contrário, essa válvula libera gás pressurizado do pressiômetro para atmosfera. Este mesmo sistema pode servir para manter a pressão constante no interior da sonda para a realização de ensaios do tipo “holding” destinados a obter parâmetros de adensamento.

#### **(vii) Caixa Eletrônica de Condicionamento de Sinal**

O condicionamento eletrônico de sinais projetado para os sensores de efeito Hall propiciou amplificação de saída compatível com a faixa total de leitura do conversor analógico-digital, aumentando em muito a sensibilidade dos sensores.

A escolha pela redução na taxa de aquisição do conversor, isto é, a sua resolução, parece não ter tido nenhum efeito negativo nos resultados finais das leituras, permitindo aquisição com respostas bem mais rápidas no computador.

O ajuste manual do valor de referência inicial (*offset*) nos potenciômetros do circuito integrado se mostrou um procedimento pouco prático e demorado, porém necessário nesta pesquisa. Em todos casos, antes dos ensaios era indispensável abrir a caixa eletrônica, expondo as partes internas às intempéries, e proceder com o ajuste individualmente por canal varias vezes até que os sinais ficassem estáveis.

## **7.2. Aplicação do Equipamento**

### **(i) A Campanha de Ensaio no Aterro da Muribeca**

Considerando as dificuldades envolvidas na troca de membranas e a facilidade de ruptura destas durante o procedimento de instalação e ensaio, a existência de uma sonda sobressalente calibrada e pronta para uso foi essencial para a continuidade dos ensaios em profundidade.

A utilização de uma equipe com experiência de sondagens em aterros de resíduos sólidos, existência de equipamentos de proteção individual adequados, área coberta de trabalho e apoio da infra-estrutura de operações do aterro foram condições essenciais para a campanha.

### **(ii) Sistema de Reação e Cravação**

O sistema de reação e cravação empregado, isto é, com avanço manual, foi suficiente para instalar a sonda até a profundidade de oito metros, contudo acredita-se que para maiores profundidades seja necessário um sistema mais robusto.

A instalação das hastes de reação com ponta helicoidal foi um processo demorado e dificultado devido a grande ocorrência de materiais fibrosos na superfície das células investigadas. A solução empregada reutilizando dois trados de reação instalados no ensaio anterior possibilitou um pouco mais de celeridade nos processos executivos.

### **(iii) Metodologias de Instalação da Sonda**

A metodologia de cravação direta não se mostrou apropriada para investigações em aterros de RSU sem que haja proteção mais robusta das membranas, pois estas não suportaram os danos causados pelo esforço de abrasão com objetos rígidos e semi-rígidos, apesar do diâmetro da ponteira ser maior. Além disto, foi observado que a orientação com que a membrana é colocada na sonda pode potencializar a ocorrência dos danos devido a saliências externas das camadas de sobreposição de borracha e lona.

A segunda metodologia testada, isto é, em pré-furo de SPT, foi passível de emprego e propiciou menos perdas das membranas por abrasão. Contudo, não foi possível avaliar de forma precisa o efeito do distúrbio causado durante a passagem do amostrador SPT nos módulos de cisalhamento do resíduo determinados.

### **(iv) Sistema de Proteção da Membrana**

A proteção das membranas com fibras de nylon e tecido externo, associado com ponteira de diâmetro maior que o corpo da sonda, não foi eficiente durante o processo de cravação direta do pressiómetro, apresentando inúmeros rasgos durante a instalação no aterro de RSU investigado. Contudo, foi mais eficaz no processo de instalação em pré-furos do SPT, não submetendo as membranas a muitos danos por abrasão. Além disto, houve pouca ocorrência de danos causados por objetos puntiformes.

Acredita-se que os danos podem ter sido potencializados por duas causas distintas durante a instalação: pelo desalinhamento do eixo da composição de hastes, que induziu a um contato maior da membrana para um determinado lado; ou devido ao fato da cavidade formada pela passagem da ponteira não permanecer com este diâmetro à medida que a cravação prossegue. Neste caso, o resíduo é empurrado pelo cone e logo em seguida tende a retornar para a condição inicial ficando em contato com a membrana.

### **(v) Execução dos Ensaios**

O intervalo de tempo empregado entre os acréscimos e decréscimos de pressão parecem ter sido suficiente para permitir que as respectivas deformações ocorressem durante os ensaios com pressão controlada. Contudo, estes ensaios demandaram um tempo razoável para se obter as curvas pressão x deformação até o limite máximo de expansão.

Os níveis de deformações radiais máximos impostos ao resíduo durante os ensaios estiveram muito aquém do desejado e foram limitados pelas características de ruptura da membrana.

Para os níveis atingidos, similar ao que já foi observado em ensaios de ruptura com resíduo em laboratório, não houve escoamento definido. Em alguns casos houve tendência de acréscimo de resistência similar que é observado em materiais com reforço de fibra.

Além disto, a realização de apenas um ciclo de carga e descarga não foi suficiente para avaliar o efeito do endurecimento nos módulos cisalhantes determinados.

## **7.3. Análise Crítica Sobre a Interpretação das Curvas**

### **(i) Característica das Curvas Pressiométricas**

As curvas pressiométricas analisadas individualmente para cada HET demonstraram comportamentos diferenciados, característicos de ensaios cravados, em pré-furo e até autoperfurantes. Isto se deu em função do emprego de dois tipos diferentes de instalação da sonda pressiométrica associados à característica de heterogeneidade do meio investigado.

Praticamente em todas as curvas que representam a média dos transdutores de efeito Hall não foi observado o escoamento do material ensaiado, mesmo para deformações da cavidade elevadas. Observou-se, sim, uma certa tendência de acréscimo de rigidez com a deformação, típico de materiais com reforço com fibras.

## **(ii) Característica de Heterogeneidade e Anisotropia**

Características de heterogeneidade e anisotropia do meio investigado, no que se refere a sua rigidez, puderam ser identificadas por meio dos resultados apresentados pelos HETs para uma mesma profundidade. Diferenças expressivas de magnitudes e comportamentos foram facilmente notadas nos ensaios em uma mesma profundidade, levando à determinação de módulos de rigidez bem diferentes entre si, mostrando a ocorrência de diversos tipos de materiais. Esta variação foi balizada por meio de resultados de CPT e SPT próximos que também demonstraram picos erráticos de resistência de ponta e à penetração nas mesmas profundidades.

## **(iii) Determinação de G**

A determinação do módulo cisalhante por meio do ajuste de todos os pontos dos ciclos de descarga e recarga juntamente com a determinação do módulo secante no recarregamento foi empregada com sucesso para o nível de descarregamento dos ensaios.

Contudo, o emprego de apenas um ciclo não foi insuficiente para avaliar o efeito de reforço observado nas curvas pressiométricas no módulo cisalhante em níveis de tensões e deformações da cavidade maiores.

A determinação do módulo de cisalhamento nos ensaios com o pressiômetro instalado por cravação direta evidenciou claramente a ocorrência de materiais rígidos em contato com a sonda. Por outro lado, este comportamento não foi observado nos ensaios com pré-furo de SPT, onde os módulos tiveram pouca variação pontual.

## **(iv) Variação de G com Profundidade**

Os módulos cisalhantes obtidos na célula C5 mostraram uma certa tendência de aumento em profundidade, possivelmente causado pelo estado de tensões em profundidade. O efeito do nível de tensões no valor de  $G$  da célula C5 foi estudado, mostrando que há aumento de rigidez com a tensão. Isto é consistente

com que normalmente é observado em materiais granulares e endossa qualitativamente o efeito do reforço de fibras notado.

Por outro lado, não houve acréscimo nos valores do módulo em profundidade obtidos na célula C4. Acredita-se que neste caso isto se deva ao fato do resíduo investigado ser novo e, portanto, ainda não ter sido submetido a processos de decomposição e recalques. Os valores de módulos determinados nesta célula foram bem inferiores aos da célula C5, onde os teores de sólidos voláteis já indicavam decomposição avançada.

#### **(v) Variação de G com Deformação**

A partir de uma comparação entre os módulos  $G_{ur}$ ,  $G_r$  e  $G_{r0,1\%}$  mostrou-se que o módulo cisalhante para resíduos sólidos é dependente do nível de deformações, similar ao que ocorre para solos. Além disto, por meio de uma adaptação com correlações obtidas para solos, foi possível produzir uma correlação direta entre o módulo cisalhante do ciclo do ensaio pressiométrico e o módulo máximo ou dinâmico  $G_0$  normalmente obtido em ensaios do tipo *cross-hole*. Entretanto, há necessidade de mais estudos para aferir as correlações propostas.

#### **(vi) Variação de G com idade do resíduo**

A estimativa da época de lançamento dos resíduos nas camadas investigadas mostrou que há uma correlação entre os valores de  $G$  determinados e a idade destes. Mostrou-se que o módulo cisalhante tem seu valor acrescido à medida que o resíduo envelhece em profundidade, possivelmente devido ao efeito da decomposição e diminuição de vazios nas células.

Por meio da determinação dos módulos de cisalhamento do resíduo investigado, levando em conta a correlação com a idade deste em associação com dados da literatura sobre módulos cisalhantes máximos no aterro Bandeirantes, em São Paulo, foi possível propor uma correlação exponencial com excelente ajuste entre o módulo pressiométrico obtido em ciclos de descarga e recarga, o módulo máximo obtido em ensaios sísmicos e a idade do resíduo.

Desta maneira foi possível comparar resultados disponíveis na literatura com os módulos determinados nesta pesquisa, mostrando boa concordância.

### **(vii) Tensão Horizontal**

A estimativa na tensão horizontal em profundidade nas células do aterro investigado foi realizada meramente como um exercício teórico de interpretação de dados, pois foram empregadas metodologias gráficas de interpretação que consideram o trecho inicial das curvas pressiométricas, o qual foi bastante perturbado durante os processo de instalação da sonda.

Apesar disto, a metodologia iterativa de interpretação usada produziu resultados coerentes com o que ocorre em análises com solo, onde a tensão horizontal é obtida em um trecho bem característico da curva pressiométrica. Em contrapartida, houve dificuldade de aplicação de tal metodologia dada a dificuldade de determinação da pressão correspondente ao início do regime plástico no ensaio.

Entretanto, os resultados obtidos mostraram que o valor de  $\sigma_h$  aumenta com a profundidade, mostrando ser importante a sua estimativa para subsidiar projetos de estruturas que serão submetidas esforços laterais. Além disto, os valores de tensão vertical calculados foram maiores dos que os de tensão horizontal obtidos pela análise gráfica.

A determinação de um coeficiente de empuxo lateral mostrou uma variação grande de valores, similar ao observado por outros autores em diferentes aterros de RSU. Além disto, foi possível concluir que o valor de coeficiente de empuxo lateral sofre influência das perdas de massa causadas pela decomposição da matéria orgânica dentro do aterro.

### **(vii) Ângulo de Atrito**

A determinação do ângulo de atrito a partir de metodologia de interpretação de curvas pressiométricas originalmente concebidas para areias, não forneceu resultados confiáveis e, portanto, foi suprimida nesta pesquisa. Acredita-se que isto se deva ao efeito dos distúrbios causados durante a instalação.

Por outro lado, os valores de ângulo de atrito determinados a partir de adaptações interpretativas dos ensaios de cone de SPT forneceram resultados similares aos encontrados na literatura técnica, permanecendo em uma faixa aceitável. Além disto, mostrou-se que o ângulo de atrito em ambas as células não apresentou um aumento crescente com a profundidade, permanecendo praticamente constante com esta. Contudo, notou-se que o ângulo de atrito, obtido em ambas as técnicas, foi menor na célula C4, sugerindo que este parâmetro tem seu valor minorado em resíduos novos.

#### **(ix) Umidade e sólidos voláteis**

As análises laboratoriais mostraram que o percentual de umidade na célula C5 estava em na faixa ótima para os processos de decomposição. Isto foi comprovado pela observação dos percentuais de sólidos voláteis bastante baixos e praticamente constantes com a profundidade nesta célula. Este quadro sugere que o processo de recirculação do lixiviado na referida célula possa ter contribuído para manter o teor de umidade em uma faixa ótima, bem como fornecido os nutrientes necessários para que o processo de decomposição ocorresse.

Por sua vez, as análises laboratoriais na célula C4 mostraram que esta ainda possuía um percentual elevado de sólidos voláteis em constituição, portanto ainda susceptível aos processos de perda de massa por decomposição da matéria orgânica contida na camada mais superficial que detinha lixo novo. Contudo, os teores de umidade observados nesta camada foram extremamente elevados, sugerindo que os processos de decomposição estavam sendo inibidos naquele período.

#### **(x) Correlações entre parâmetros**

Mostrou-se que há uma correlação exponencial entre os teores de umidade e de sólidos voláteis nas células investigadas. Esta correlação demonstra que realmente o resíduo que está com teor de umidade dentro da faixa ideal para ocorrência de processos anaeróbios de decomposição, tem a sua matéria orgânica disponível já praticamente toda decomposta.

O efeito da decomposição nos módulos cisalhantes determinados, através da obtenção de uma relação entre %SV e G, não foi tão evidente quanto se esperava, pois o espaço amostral empregado empregou pouca variação de %SV. Contudo, o ajuste logarítmico utilizado leva à crer que há uma tendência ganho de rigidez à medida que a matéria orgânica é decomposta.

As correlações entre resistência de ponta no ensaio de CPT, resistência a penetração no ensaio SPT e módulo cisalhante no ensaio PMT, mostraram ajustes lineares entre si.

#### **7.4. Sugestões de Continuidade da Pesquisa**

- Acredita-se que uma nova sonda pressiométrica deva ser construída levando-se em consideração o conhecimento adquirido durante a investigação com RSU, bem como as melhorias sugeridas;
- Investigações devem ser realizadas com outros fabricantes de sensores do tipo Hall para avaliar a eficiência de cada um em função do projeto do sistema de medição de deslocamentos. Além disto, é necessário avaliar o efeito do encapsulamento dos sensores para fins de proteção contra umidade e demais tipos de sujeira que possam interferir na resposta do sensor;
- É necessário que se avalie emprego de pequenas chapas de aço inoxidável como suporte dos sensores tipo Hall em detrimento as de acrílico, principalmente com relação ao efeito no fluxo do campo magnético ao redor do Hets;
- Outro circuito de condicionamento eletrônico deve ser projetado com os demais tipos de sensores futuramente avaliados, onde não haja necessidade de abertura da caixa eletrônica para ajuste do *off set* inicial dos sensores do sistema de medição de deslocamentos;
- Outras metodologias para colocação da membrana devem ser desenvolvidas para facilitar a troca destas, inclusive em campo;
- Sugere-se o estudo de outros tipos de membranas que possam oferecer maiores deformações e compatíveis com o contexto do RSU. Indica-se a

avaliação do emprego somente de borracha natural na fabricação das membranas, pois é muito mais elástica e resistente à abrasão, que deverá ser usada em com um sistema de proteção externo.

- Indica-se o projeto e construção de um sistema de proteção externa das membranas para permitir a cravação do pressiómetro. Este sistema pode ser similar às lanternas chinesas, sendo construído com lâminas de aço inoxidável delgadas, sobrepostas umas sobre as outras e devidamente fixadas em anéis bi-partidos em suas extremidades. Estes anéis devem estar livres para se movimentar longitudinalmente no corpo da sonda em função do aumento radial da membrana quando de sua expansão.
- O projeto do novo pressiómetro deve possibilitar a medição de pressão dentro da sonda em detrimento ao monitoramento na superfície. Para tanto, indica-se o uso de transdutores de pressão miniatura;
- A localização dos sensores de temperatura deve ser modificada para estar em contato direto com o meio investigado e fornecer informações reais deste, considerando que o fluxo de gás pressurizado no interior da sonda tem efeito nas leituras de temperatura do sensor.
- Sugere-se a construção de um painel de controle mais robusto, com manômetro para aferição das pressões aplicadas e com um sistema para execução de ensaios com deformação controlada;
- É necessário construir uma ponteira cônica instrumentada com células de carga para medição de resistência de ponta e atrito lateral, e com possibilidade de medição de parâmetros ambientais e coleta de gás ou líquidos.
- É fundamental que se teste o equipamento sob condições controladas, para que se possa identificar melhor a “assinatura” deste. Para tanto, sugere-se a aplicação do mesmo em uma câmara de calibração, tanto com resíduo natural quanto com resíduo artificial, para determinação de parâmetros de deformabilidade;
- Sugere-se o emprego na câmara de calibração de materiais com diferentes características de rigidez, devidamente dispostos, para avaliar melhor o desempenho dos vários braços móveis na identificação de heterogeneidade e anisotropia do meio;

- Sugere-se a execução de ensaios em RSU, tanto em campo quanto sob condições controladas, com diferentes velocidades de aplicação de pressões, para avaliar o efeito nos módulos cisalhantes;
- Além disto, é importante realizar ensaios com RSU empregando-se diversos ciclos de descarga e recarga, principalmente em patamares de deformação da cavidade maiores, para avaliar o efeito do nível de tensões e deformações nos módulos e principalmente o comportamento de reforço de fibras;
- Indica-se a realização de ensaios do tipo *cross-hole* e pressiométricos em um mesmo perfil de RSU para a comparação dos módulos cisalhantes e aferição da correlação proposta nesta pesquisa;
- Sugere-se, ainda, uma melhor avaliação do módulo pressiométrico do resíduo em função do nível de decomposição deste, a partir do ensaio com RSU com diferentes teores de sólidos voláteis;
- A continuidade da pesquisa deve, ainda, estar ligada ao desenvolvimento de uma metodologia de interpretação específica para RSU, que deve levar em conta o efeito de reforço de fibras e os efeitos de degradação biológica;
- Além disto, propõe-se como continuidade da pesquisa, a realização de uma modelagem numérica do ensaio pressiométrico em RSU e a elaboração de um modelo numérico de previsão de deformações a partir dos parâmetros obtidos nos ensaios reais;
- Finalmente, como continuidade da pesquisa deve-se aplicar o equipamento desenvolvido em materiais geotécnicos cujo comportamento é conhecido ou facilmente obtido em campo ou laboratório, como, por exemplo, depósitos de argila mole, onde a cravação do pressiómetro é facilitada. A comparação de resultados deve ser realizada, principalmente, para melhorar o conhecimento a respeito da assinatura, características e limitações do equipamento, além de possibilitar análises comparativas de campo e laboratório.

AKBAR, A. **Development of low cost in-situ testing devices**. Newcastle, UK, 2001, 369 p. PhD Thesis - Department of Civil Engineering, University of Newcastle Upon Tyne.

ALLAN, P. G. **Developments of a self-boring pressuremeter for the in-situ testing of weak rocks**. Newcastle, UK, 1992, 345 p. PhD Thesis - Department of Civil Engineering, University of Newcastle Upon Tyne.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12069**: solo – ensaio de penetração de cone in situ. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8036**: programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios. Rio de Janeiro, 1983

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502**: terminologia de rochas e solos, Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6484**: solo – sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457**: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

AZEVEDO, R. F.; CARVALHO, R. F.; AZEVEDO, I. C. D & MARQUES, E. A. G. M. Variação com a idade de características mecânicas dos resíduos do aterro sanitário de Santo André. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 5 – REGEO'2003. 2003, São Paulo. **Anais**, Porto Alegre, Maio de 2003, CD-ROM.

BALDI, G.; BELLOTTI, R.; GIONNA, V.; JAMIOLKOWSKY, M. & PASQUALINI, E. Interpretation of CPTs and CPTUS: drained penetration of sands. In: International Geotechnical Seminar, IV. **Proceedings...** Cingapura, 1986.

BEEN, K. & JEFFERIES, M. G. A state parameter for sand. **Geotechnique**, v. 35, n. 2, pp. 99 – 112, 1985

BEGUELIN, F., JÉZEQUEL, J. F. MEE, E. L. & MEHAUTE, A. L. Expansion of cylindrical probes in cohesive soils. ASCE, **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, n. 98, pp 1129 – 1142, 1972.

BELLOTTI, R.; GHIONNA, V. N.; JAMIOLKOWSKI, M.; LANCELLOTTA, R. & MANFREDINI, G. Deformation characteristic of cohesionless soils from in-

situ tests. **Proceed. of In Situ'86 – Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering**. ASCE GSP, n. 6, New York, pp. 47 – 43. 1986

BENOIT, J.; OWEIS, I. S & LEUNG, A. Self-boring pressuremeter testing of Hackensack Meadows varved clays. In: International Symposium on Pressuremeters, 3<sup>rd</sup>, 1990, Oxford. **Proceedings...** 1990, pp. 85-94.

BEGEMANN, H. K. S. P. The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engoneering, VI, 1965. **Proceedings...** Montreal, 1965, Vol. 1, pp. 17 – 20.

BRIAUD, J. L. **The pressuremeter**. Rotterdam: A. A. Balkema, 1992, 322p.

CAICEDO, B.; GIRALDO, E.; YALMIN, L. & SOLER, N. The landslide of Doña Juana landfill in Bogota. A case study. In: Environmental Geotechnics, 4<sup>th</sup> – 4'ICEG, Rio de Janeiro, 2002a. **Proceedings...** de Mello & Almeida (eds), Rio de Janeiro, 2002a, v. 1, pp. 171 –175.

CAICEDO, B.; YALMIN, L; GIRALDO, E.; CORONADO, O. & SOLER, N. Geomechanical properties of municipal solid waste in Doña Juana sanitary landfill. In: Environmental Geotechnics, 4<sup>th</sup> – 4'ICEG, Rio de Janeiro, 2002a. **Proceedings...** de Mello & Almeida (eds), Rio de Janeiro, 2002b, v. 1, pp. 177 – 182.

CAO, L. F.; THE, C. I. & CHANG, M. F. Undrained cavity expansion in modified Cam clay I: theoretical analysis. **Géotechnique**, v. 51, n. 4, pp. 323 – 334, 2001.

CAREY, P. J.; KORAGAPPA, N. & GURDA, J. J. A case study of the Brookhaven landfill, Long Island, New York. In: WasteTech'93 Conference. 1993 **Proceedings...**, Marina Del Rey, CA, National Solid Waste Management Association, Washington, DC, 1993.

CARTER, J. P.; BOOKER, J. R. & YEUNG, S. K. Cavity expansion in cohesive frictional soils, **Géotechnique**, v. 36, n. 3, pp. 349 – 358, 1986.

CARTIER, G. & BALDIT, R. Comportement géotechnique des discharges de résidus urbains. **Bull. de Liason des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, n. 128, pp. 55 – 64, 1983.

CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. São Carlos, 1999, 300p. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo,.

CARVALHO, M. F.; VILAR, O. M. & KAIMOTO, L. S. A. Estudo da compressibilidade de resíduos sólidos urbanos. **Revista Solos e Rochas**, v. 23, n. 1, pp. 3 – 19, Abr 2000.

CEPOLINA, M.; KAIAMOTO, L. S. A. & LUDEMANN, S. M. Investigação de condicionantes geotécnicos de aterros sanitários. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, X – X COBRAMSEF, Foz do Iguaçu, 1994. **Anais**, Foz do Iguaçu, 1994, v. 3, pp. 979 – 986.

CHANG, M. F.; TEH, C. & CAO, L. F. Critical state strength parameteres of saturated clays from modified Cam clay. **Can. Geotech. J.**, v. 36, n. 5, pp. 876 – 890, 1999.

CHEN, R. H. e CHOU, I. H. The settlement behaviour of municipal waste. In: 4<sup>th</sup> International Symposium on the Environmental Geotechnology, Boston, USA, 1998. **Proceedings...** Boston, USA, 1998, v. 2, pp. 1246 – 1254.

CLARKE, B. G. The interpretation of pressuremeter tests to produce design parameters. Predictive Soil Mechanics, In: The Wroth Memorial Symposium, 1993, Oxford. **Proceedings....** Oxford, 1993, pp. 75 – 88.

\_\_\_\_\_. **Pressuremeter in geotechnical design.** Blackie Academic & Professional, Glasgow, 1995, 364 p.

\_\_\_\_\_. Pressuremeter testing in ground investigation. Part I – site operations. **Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engrg.**, v. 119, p. 96-108, 1996.

\_\_\_\_\_. Pressuremeter testing in ground investigation. Part II – interpretation. **Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engrg.** v. 125, pp 42 – 52, 1997.

CLARKE, B. G. & ALLAN, P. G.. A self-boring pressuremeter for testing weak rock. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, XII, 1986. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 1989, v 1, pp 211-213.

CODUTO, D. P. & HUITRIC, R. Monitoring landfill movements using precise instruments. **Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice**, ASTM STP 1070, A. Landva, G. D. Knowles (eds), ASTM, Philadelphia, 1990, pp. 358 – 370.

CUDMANI, R. & OSINOV, V. A. The cavity expansion problem for the interpretation of cone penetration and pressuremeter tests. **Can. Geotech. J.**, v. 38, pp. 622 – 638, 2001.

CUNHA, R. P. Lantern effect on pressuremeter shear modulus in sand. **Can. Geotech. J.**, v. 33, pp. 482 – 487, 1996.

DE MELLO, V. F. B. The standard penetration test. State of the art. In: Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, IV, 1971. **Proceedings....** Porto Rico, 1971, pp. 1 – 86.

DÉCOURT, L. The standard penetration test – state of the art report. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, XII, 1989. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 1989. Vol. IV, pp. 2405 – 2416.

\_\_\_\_\_. Special problems on foundation. In: Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, XIII, 1991. **Proceedings...** Viña del Mar, 1991. Vol. IV, pp. 1953 – 2001.

DEL GRECO, O. & OGGERI, C. Shear resistance tests on solid municipal wastes. In: 1<sup>ST</sup> International Congress on Environmental Geotechnics, 1<sup>st</sup>, 1994. **Proceedings...** Bitech Publishers, Edmond, Alberta, Canada, Julho 10 –15, 1994, pp. 643 –650.

DIXON, N. & JONES, D. R. V. 1998. Stress states in, and stiffness of, landfill waste. In: Geotechnical Engineering of Landfills Symposium, 1998. **Proceedings...** Eds. Dixon, N.; Murray, E. J. & Jones, D. R. V., Pubs. Thomas Telford, Nottingham, UK, 1998. pp. 19 – 34.

DIXON, N.; JONES, D. R. V. & WHITTLE, R. W. Mechanical properties of household waste: in situ assessment using pressuremeters. In: International Waste Management Landfill Symposium, 7<sup>th</sup> – Sardinia'99, 1999. **Proceedings...** S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, Outubro 1999, pp. 453 - 460

DIXON, N.; NG'AMBI, S. C.; JONES, D. R. V. & CONNELL, A. K. The role of waste deformations on landfill steep side wall lining stability. In: Annual International Solid Waste Exposition, 38<sup>th</sup> – WASTECON'2000, 2000. **Proceedings...** The Institute of Waste Management: South Africa, 2000, Vol. 2, pp. 379 – 388.

DODT, M. E.; SWEATMAN, M. B. e BERGSTROM, W. R. Field measurements of landfill surface settlements. **Geotechnical Practice for Waste Disposal**, ASCE GSP 13, Michigan, 1987, pp. 406 – 417.

DUNPLANCIC, N. Landfill deformation and stability analysis. **Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice**, ASTM STP 1070, A. Landva e G. D. Knowles (eds), ASTM, Philadelphia, 1990, pp. 303 – 310.

DVIRNOFF, A. H. & MUNION, D. N. Stability failure of a sanitary landfill. In: International Symposium on Environmental Geotechnology, 1986. **Proceedings...** H. Fang (ed), Bethlehem, PA, 1986.

EARTH TECHNOLOGY. **Instability of landfill slope, Puente Hills Landfill, Los Angeles County, California**, Submitted to L.A. County Sanitation District, 1988.

EDINCLILER, A.; BENSON, C. H. & EDIL, T. B. **Shear strength of municipal solid waste. Interim Report – Year 1**. University of Wisconsin Madison, Environmental Geotechnics Report 96-2, Fevereiro, 1996, 65 p.

EID, H. T.; STARK, T. D.; EVANS, W. D. & SHERRY, P. E. Municipal solid waste slope failure I: waste and foundation soil properties. **J. Geotech. Geoenvironmental Engineering**, ASCE, v. 126, n. 5, pp. 397 – 407, Maio 2000.

ELIASSON, R. M. Load bearing characteristics of landfills. **Engineering News Record**, v. 369, pp. 103 – 105, 1941,

EMCON. **Analysis of deformation under static and seismic loading – West Contra Costa sanitary landfill**, Richmond, CA, Jan. 1989.

FAHEY, M. & JEWEL, R. Effect of pressuremeter compliance on measurement of shear modulus, In: International Symposium on Pressuremeters, 3<sup>rd</sup>, 1990, Oxford. **Proceedings...** Oxford, 1990, pp. 115-124.

FAHEY, M.; JEWELL, R. J. & BROWN, T. A. A self-boring pressuremeter system. **Geotechnical Testing Journal**, ASTM, v. 11, n. 3, pp. 187 – 194, 1988.

FERREIRA, R. S. Large-strain undrained pressuremeter interpretation based on loading and unloading data. **Can. Geotech. J.**, v. 31, pp. 71 – 78, 1994.

FERREIRA, R. S. & ROBERTSON, P. K. Interpretation of undrained self-boring pressuremeter test results incorporating unloading. **Can. Geotech. J.**, v. 29, pp. 918 – 928, 1992.

FOOSE, G. **Shear strength of sand reinforced with shredded waste tires**. , Madison, EUA, 1993. 173p. M.Sc. Dissertation - Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin.

FUCALE, S. P. Resistência em aterros de resíduos sólidos urbanos. **I Seminário de Tese de Doutorado**, UFPE, 2000.

GABR, M. A. & VALERO, S. N. Geotechnical properties of municipal solid waste. **Geotechnical Testing Journal**, v. 18, n. 2, pp. 241 – 251, Junho 1995.

GASPARINI, P. A.; SAETTI, G. F. & MARASTONI, M. Experimental research on MSW compaction degree and its change with time. In: International Landfill Symposium, 5<sup>TH</sup> – Sardinia'95. 1995. **Proceedings....** S. Margherita di Pula, Cagliari, Sardinia, Italy, October 2-6, 1995, pp. 833 – 842.

GERBER, R. **CWS slide investigation report**. 1991

GHIONNA, V. N.; KARIM, M. & PEDRONI, M. Interpretation of unload-reload modulus from pressuremeter tests in sand. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, XII. 1994. **Proceedings...**, New Delhi, India, 1994, pp 115 – 120.

GIBSON, R. E. & ANDERSON, W. F In situ measurements of soil properties with the pressuremeter. **Civ Engng Public Wks Rev**, v. 56, pp. 615 – 618, 1961.

GRISOLIA, M.; NAPOLEONE, Q. & TANCREDI, G. Contribution to a technical classification of MSW. In: International Landfill Symposium, 5<sup>th</sup>, 1995. **Proceedings...** S. Margherita Di Pula, Cagliari. Vol. 2, pp 703 - 710, 1995.

HONEYWELL. **Hall effect sensing and application**. Texto disponível em: <http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/solidstate/#technical>, acessado em 18/02/2002, 2002

HAWKINS, P. G.; MAIR, R. J.; MATHIESON, W. G. & MUIR WOOD, D. Pressuremeter measurement of total horizontal stress in stiff clay. In: International Symposium on Pressuremeters, 3<sup>rd</sup>. 1990. **Proceedings...** Oxford, 321 – 408 pp, 1990.

HINKLE, R. D. Landfill site reclaimed for commercial use as container storage facility. **Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice**, ASTM STP 1070, A. Landva e G. D. Knowles (eds), ASTM, Philadelphia, 1990, pp. 331 – 344.

HOULSBY, G. T.; CLARKE, B. G. & WROTH, C. P. Analysis of the unloading of a pressuremeter in sand. In: 2<sup>nd</sup> International Symposium on Pressuremeter and its Marine Applications, 2<sup>nd</sup>, 1986. **Proceedings...**, Briaud e Audibert (eds), ASTM STP 950, pp. 245 – 262, 1986.

HOULSBY, G. T. & NUTT, N. R. F. Development of the cone pressuremeter test in clay. **Géotechnique**, v. 30, n. 4, pp. 757 – 587, 1993

HOULSBY, G. T. & SCHNAID, F. Interpretation of shear modulus from cone pressuremeter tests in sand. **Géotechnique**, v. 44, n. 1, pp. 147 – 164, 1994.

HOULSBY, G. T. & WITHERS, N. J. Analysis of the cone pressuremeter test in clay, **Géotechnique**, v. 38, n. 4, pp. 575 – 587, 1988.

HOULSBY, G. T. & YU, H. S. Finite element analysis of the cone pressuremeter test. In: International Symposium on Pressuremeters, 3<sup>rd</sup>, 1990. **Proceedings...** Oxford, pp. 221 – 230, 1990.

HOWLAND, J. & LANDVA, A. Stability analysis of a municipal solid waste landfill. **Stability and Performance of Slope and Embankments – II**, ASCE Geotechnical Special Publication, n. 31, pp. 1216 – 1231, 1992.

HSIEH, Y. M.; WHITTLE, A. J. & YU, H. S. Interpretation of pressuremeter tests in sand using advanced soil model. **J. Geotech. Geoenvironmental Engrn**, ASCE, v. 128, n. 3, pp 274 – 278, 2002.

HUANG, A. B.; HOLTZ, R. D. & CHAMEAU, J. L. 1988. A calibration chamber for cohesive soils. **Geotechnical Testing Journal**, ASTM, v. 11, n. 1, pp. 30 – 35, 1988.

HUGHES, J. M. & ERVIN, M. C. Development of a high pressuremeter for determining the engineering properties of soft to medium strength rocks. In: Australian-New Zealand Conference on Geomechanics, 3<sup>RD</sup>, 1980. **Proceedings...**, Wellington, 1980, v. 1, pp. 243 – 247.

HUGHES, J. M. O. & ROBERTSON, P. K. Full displacement pressuremeter testing in sands. **Can. Geotech. J.**, v. 22, pp. 298 – 302, 1985.

HUGHES, J. M.; WROTH, C. P. & WHNDLE, D. Pressuremeter tests in sand. **Géotechnique**, v. 27, n. 4, pp. 455 – 477, 1977.

JAMIOLKOWSKI, M.; LADD, C. C.; GERMANINE, J. T. & LANCELLOTTA, R. New developments in field and laboratory testing of soils. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 11<sup>th</sup>, 1985. **Proceedings...** São Francisco, USA, 1985

JEFFERIES, M. G. Determination of horizontal geostatic stress in clay with self-bored pressuremeter. **Can. Geotech. J.**, v. 25, pp. 559 – 573, 1988.

JESSBERGER, H. Geotechnical aspects of landfill design and construction. Part 2: material parameters and test methods. **Proc. Instn. Civ. Engrs Geotech. Engrg.**, n 107, pp. 105 – 113, Abril 1994.

JESSBERGER, H. & KOCKEL, R. Mechanical properties of waste materials. In: Conferenze di Giotechnia di Torino, XV. **Proceedings...** Torino, 1991, pp. 1 – 40.

\_\_\_\_\_. Determination and assessment of the mechanical properties of waste material. In: Symposium on Geotechnics Related to the Environmente, Waste Disposal by Landfill – GREEN'93, 1995. **Proceedings...** Bolton, UK, 1995, Balkema, Rotterdam, pp. 313 – 322.

JESSBERGER, H. L.; SYLLWASSCHY, O. & KOCKEL, R. Investigation of waste body-behavior and waste-structure-interaction. In: International Landfill Symposium, 5<sup>th</sup> -. SARDINIA'95. 1995. **Proceedings...** S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995, pp. 731 – 743.

JÉZEQUEL, J. F.; LAMY, J. L. & PERRIER, M. The LPC-TLM pressio-pressuremeter. In. International Symposium on Pressuremeter and its Marine Applications, 2<sup>nd</sup>, 1986. **Proceedings...**, Briaud e Audibert (eds), ASTM STP 950, Paris 1986, pp. 275 – 287.

JÉZEQUEL, J. F.; LEMANSSON, H. & TOUZÉ, J. Le pressiomètre Louis Ménard quelques problèmes de mise em oeuvre et leur influence sur lês valeurs pressiométriques, **Bull. De Liaison du LCPC**, n. 32, pp. 97 – 120, 1968.

JUCÁ, J. F. T. Disposição final dos residuos sólidos urbanos no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, V – REGEO. 2003. **Anais...** Porto Alegre, RS, 2003. pp. 443 – 470.

JUCÁ, J. F. T.; CABRAL, J. J. P. S.; MONTEIRO, V. E. D.; SANTOS, S. M. & PERRIER Jr, G. S. Geotechnics of a municipal solid waste landfill in Recife, Brazil. In: International Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, 1997. **Proceedings...** M. S. S. Almeida (ed), Balkema, 1997, pp. 429 – 436.

JUCÁ, J. F. T.; MELO, V. L. A. & MONTEIRO, V. E. D. Ensaio de penetração dinâmica (SPT) em aterros de resíduos sólidos. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, IX – SILUBESA. 2000. **Anais...** Porto Seguro, Bahia, 2000. CD-ROM

JUCÁ, J. F. T.; MONTEIRO, V. E. D.; OLIVEIRA, F. J. S. & MACIEL, F. J. Monitoramento ambiental do aterro de resíduos sólidos da Muribeca. In: Seminário sobre Resíduos Sólidos Urbanos, III. 1999. **Anais...** Toledo, Paraná, 1999. CD-ROM.

JUCÁ, J. F. T. & MELO, V. L. A. J. Monitoramento de sólidos, líquidos e gases do aterro de Aguazinha-PE. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 4º–REGEO'99. 1999. **Anais...** São José dos Campos – SP, 1999, v. 1, pp. 434-441.

KAVAZANJIAN *et al.* Evaluation of MSW properties for seismic analysis. **Geoenvironment 2000: characterization, containment, remediation, and performance in environmental geotechnics**, ASCE GSP 46, Y. B. Acar e D. E. Daniel (eds), New Orleans, 1995, Vol. 2, pp. 1126 – 1142.

KAVAZANJIAN *et al.* Non-Intrusive Reyleigh wave investigations at solid waste landfills, In: International Conference on Environmental Geotechnics, 1<sup>st</sup> - 1<sup>st</sup> ICEG. 1994. **Proceedings...** Edmonton, Alberta BiTech Publishers, 1994, pp.

KOCKEL, R. & JESSBERGER, H. Stability evaluation of municipal solid waste slopes. In. European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, XI. 1995. **Proceedings...**, v. 2, 1995, pp. 267 – 272.

KODA, E. In-situ tests of MSW geotechnical properties. In: International Symposium on Geotechnics Related to Environment, 2<sup>nd</sup> – GREEN'2 – Contaminated and derelict land. 1997. **Proceedings...** R. W. Sarsby (ed), Krakov, Poland, Setembro 1997, Thomas Telford, London, 1998, pp. 247 – 254.

KOGLER, F. Bangrundprufund im Bohrloch. **Der Bauingenier**, pp. 266-270, 1933.

KÖLSCH, F. Material values for some mechanical properties of domestic waste. In: International Landfill Symposium, 5th. 1995. **Proceedings...** Cagliari, Italy, 1995, vol. 2.

LANCELLOTTA, R. **Geotechnical Engineering**. Amsterdã: Balkema, 1995.

LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. F. **Soil Mechanics, SI Version**. John Wiley & Sons, New York. 1979, 551p.

LADANYI, B. In situ determination of undrained stress-strain behaviour of sensitive clays with the pressuremeter. **Can. Geotech. J.**, v. 9, pp 313 – 319, 1972.

LANDVA, A. & CLARK, J. Geotechnical testing of wastefill. In: Canadian Geotechnical Conference, 39<sup>th</sup>. 1986. **Proceedings...** Ottawa, Ontario, 1986, pp. 371 – 385.

\_\_\_\_\_. Geotechnics of Waste Fills. **Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice**, ASTM STP 1070, A. Landva e G. D. Knowles (eds), ASTM, Philadelphia, 1990, pp. 86 – 103.

LINS, E. A. M. **Utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro da Muribeca**. Recife, Pernambuco, 2003. 142p.

Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. Recife, 2003. 159p. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco.

MAHLER, C. F. & LAMERE NETO, A. Análise de estabilidade do vazadouro da rua Duarte da Silveira (Petrópolis). In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, XXVII, 2000. **Anais...** 2000, CD-ROM.

MAIR, R. J & WOOD, D. M., **Pressuremeter Testing – Methods and Interpretation**, Butter-Worth, 1987, 167p.

MANASSERO, M. Stress-strain relationships from drained self-boring pressuremeter tests in sand. **Geotechnique**, v. 39, n. 2, pp. 293 – 308, 1989.

MANASSERO, M.; VAN IMPE, W. F. & BOUAZZA, A. Waste disposal and containment. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 2<sup>nd</sup> – ICEG, 1996. **Proceedings...** Osaka, 5 -8 novembro 1996, vol. 1, pp. 193 – 242.

MARSLAND, A. & RANDOLPH, M. F. Comparisons of the results from pressuremeter tests and large in-situ plate tests in London clay. **Geotechnique**, V. 22, N. 2, pp. 217 – 243, 1977.

MARIANO, M. O. H. & JUCÁ, J. F. T. Monitoramento de recalques no aterro de resíduos sólidos da Muribeca. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, XI. 1998. **Anais...** Brasília, 1998, v. 3, pp. 1671 – 1678.

MELO, M. C. **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca**. Recife, Pernambuco, 2003. 127p. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco.

MÉNARD, L. **An apparatus for measuring the strength of soils in place**, Illinois, EUA, 1957a. Phd Thesis, Dept Civil Engineering, University of Illinois,

\_\_\_\_\_. Measures in situ des propriétés physiques des soils. **Annales des Ponts et Chaussees**, no. 14, pp. 357 – 377, 1957b.

\_\_\_\_\_. Calcul de la force portante des foundations sur la base des resultants des essais pressiométriques, **Sols – Soils**, v. 5, n. 5, pp. 9 – 24, 1963.

MERZ, R. C. & STONE, R. Sanitary landfill behavior in an aerobic environment. **Public Works**, pp. 67 – 70, 1968

MITCHELL, R. A. & MITCHELL, J. K. Stability evaluation of waste landfills. **Stability and Performance of Slopes and Embankments**, ASCE Geotechnical Special Publication, n. 31, v. 2, 1992, pp. 1155 – 1187.

MONTEIRO, V. E. D. **Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do aterro da Muribeca**. Recife, 2003. 232p. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco.

MUIR-WOOD, D. Strain dependent moduli and pressuremeter tests. **Geotechnique**, v. 40, n. 26, pp. 509 -512, 1990

OLIVEIRA, P. A. S. **Análise e interpretação de ensaios pressiométricos realizados em solo saprolítico de gnaiss e em depósitos sedimentares granulares da cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 1990. 142p. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, D. A. F. **Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos**. Brasília, 2002. 154p. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

OWEIS, I. S. **Stability of sanitary landfills**. Metropolitan Section ASCE Soil and Foundation Group, Seminar on Geotechnical Aspects of Waste Management, New York, Dez 1985, 34 p.

PAES, R. F. C. **Caracterização do chorume produzido no aterro da Muribeca – PE**. Campina Grande, 2003. 150p. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

PAGOTTO, A. & RIMOLDI, P. Design and construction of a geogrid reinforced embankment over waste material. In: **GEOSYNTHETICS'97, Proceedings...**, St. Paul, New Orleans, LA, 1987, pp. 320 – 331.

PALMER, A. C. Undrained plane-strain expansion of a cylindrical cavity in clay: a simple interpretation of the pressuremeter test, **Géotechnique**, v. 22, n 3, pp. 451-457, 1972.

PALMISANO, A. C. & BARLAZ, M. A. **Microbiology of solid waste**. A. C. Palmisano & M. A. Barlaz (eds). 224p.

PELKEY, S. A.; VALSANGKAR, A. J. & LANDVA, A. Shear displacement dependent strength of municipal solid waste and its major constituent. **Geotechnical Testing Journal**, v. 24, n. 4, pp. 381 – 390, Dezembro 2001.

PEREIRA, A. G. H.; SOPEÑA, L. e MATEOS, M. T. Compressibility of a municipal waste landfill. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 4<sup>th</sup>. 2002. **Proceedings...**, Rio de Janeiro, 2002, pp. 201 – 206.

PINTO, C. S. & ABRAMENTO, M. Características das argilas rijas e duras, cinza-esverdeadas de São Paulo determinadas por pressiômetro de auto-furação Camkometer. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, XI – COMBRAMSEG. 1998. **Anais...** Brasília, 1998, Vol II, pp. 871 – 878.

REID, W. M.; St JOHN, H. D.; FYFFE, S. & RIGDEN, W. J. The push-in pressuremeter. In: International Symposium on Pressuremeter and its Marine Applications, 2<sup>nd</sup>. 1986. **Proceedings...** Briaud e Audibert (eds), ASTM STP 950, Paris, 1982, pp. 247 – 261.

RICHARDSON, G. & REYNOLDS, D. Geosynthetic considerations in a landfill on compressible clays. In: Geosynthetics'91 Conference. 1991. **Proceedings...** Industrial Fabrics Association International, St. Paul, Atlanta, 1991, pp. 507 – 598.

ROBERTSON, P. K. In situ testing and its application to foundation engineering, **Can. Geotech. J.**, v. 23, pp. 573 – 594, 1986.

ROBERTSON, P. K. & CAMPANELLA, R. G. Interpretation of cone penetrometer test, part I: sand. **Canadian Geotechnical Journal**. v. 20, n. 4, pp. 718 – 733, 1983.

ROBERTSON, P.K & HUGHES, J. M. O. Determination of properties of sand from self-boring pressuremeter tests. In. International Symposium on Pressuremeter and its Marine Applications, 2<sup>nd</sup>. 1986. **Proceedings...** Briaud e Audibert (eds), ASTM STP 950, Texan, USA, 1986, pp. 283 – 302.

RODRÍGUEZ, J. A. & VELANDIA, E. Geotechnical monitoring program in Bogota's municipal solid waste landfill after the 1997 landfill slide. In: Environmental Geotechnics, 4<sup>th</sup> – 4<sup>th</sup> ICEG, Rio de Janeiro, 2002. **Proceedings...** de Mello & Almeida (eds), Rio de Janeiro, 2002, v. 1, pp. 145 –150.

ROWE, P. W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. **Proc. R. Soc. Lond**, v. 267, pp. 500 – 527, 1962.

SANCHEZ-ALCITURRI, J. M.; PALMA, J.; SAGASETA, C. & CANIZAL, J. Three years of deformation monitoring at Meruelo landfill. In: Symposium on Geotechnics Related to the Environment, 1<sup>st</sup> – GREEN'93, 1993. **Proceedings...** Bolton, England, 1993. 365 – 373 pp.

SAMPAIO JUNIOR, J. L. C; PINTO, C. S. & CARVALHO, D. Propriedades de um solo residual do campo experimental da Unicamp, determinadas por pressiómetro de auto-perfuração de Cambridge – Camkometer. In.. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, XII. 2002. **Anais...** São Paulo, 2002, pp.

SANTOS, S. M.; PONTES FILHO, I.; JUCÁ, J. F. T. & SANTOS, E. A. Simulação numérica de provas de carga realizadas em um aterro de resíduos sólidos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, XI. 1998. **Anais...** Brasília, 1998, v. 1, pp. 269 – 276.

SÁNCHEZ-ALCITURRI, J. M.; PALMA, J.; SAGASETA, C. & CAÑIZAL, J. Three years of deformation monitoring at Meruelo landfill. In: Symposium on Geotechnics Related to the Environment, Waste Disposal by Landfill - Green'93. 1995. **Proceedings...** Bolton, UK, 1995, Balkema, Rotterdam, pp. 365 – 371.

SCHMERTMANN, J. H. Guidelines for cone penetration test, performance and design. **US Federal Highway Administration, Washington, DC, Report FHWS-78-209**, 1978.

SCHNAID, F. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. São Paulo, Oficina de Textos, 2000, 189p.

SCHNAID, F. & HOUSLBY, G.T. Measurement of the properties of sand in a calibration chamber by the cone pressuremeter test, **Géotechnique**, v. 42, n. 4, pp. 587 – 601, 1994.

SCHNAID, F. & ROCHA FILHO, P. Experiência de aplicação do ensaio pressiométrico em solos estruturados parcialmente saturados. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, X. 1994. **Anais...** Foz do Iguaçu, 1994. pp. 475-485.

SELVADURAI, D. Large strain and dilatancy effects in pressuremeter, **J. Geotech. Engng. Div.**, ASCE, 110 (NGT3), pp. 421 – 436, 1984.

SHARMA, H. D.; DUKES, M. T. & OLSEN, D. M. Field measurements of dynamic moduli and Poisson's ratios of refuse and underlying soils at a landfill site. **Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice**, ASTM STP 1070, A. Landva, G. D. Knowles, Ed., ASTM, Philadelphia, 1990, pp. 57 –70.

SIEGEL, R.; ROBERTSON, R & ANDERSON, D. Slope stability investigations at a landfill in southern California. **Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice**, ASTM STP 1070, A. Landva e G. D. Knowles (eds), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 259 – 284.

SIMÕES, G. F. & DE CAMPOS, T. M. P. A coupled mechanical and biological model to estimate settlement in solid waste landfills. . In: Environmental Geotechnics, 4<sup>th</sup> – 4<sup>th</sup> ICEG, Rio de Janeiro, 2002. **Proceedings...** de Mello & Almeida (eds), Rio de Janeiro, 2002 pp. 283 – 288.

SIMÕES, G. F. **Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos**, Rio de Janeiro, 2000, 125 p. Tese de Doutorado, Depto. Eng. Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

SINGH, S. & MURPHY, B. Evaluation of the stability of sanitary landfills. **Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice**, ASTM STP 1070, A. Landva e G. D. Knowles (eds), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 240 – 258.

SOARES, A. P. A. L. **Avaliação de propriedades termo-hidráulicas de solos requeridas na aplicação de técnica de sorção térmica**. Rio de Janeiro, 2004, 290p. Tese de Doutorado, Depto. Eng. Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

SOUZA COUTINHO, A. G. F. Radial expansion of cylindrical cavities in sandy soils: application to pressuremeter tests. **Can. Geotech. J.**, v. 27, pp. 737 –748, 1990.

SOWERS, G. F. Foundation problems in sanitary landfill. **Journal of the Sanitary Engineering Division**, v. 94, n. SA1, pp. 103 – 116, 1968.

SOWERS, G. F. Settlement of waste disposal fills. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 8<sup>th</sup>. 1973. **Proceedings...** Moscow, 1973, part 2, pp. 207 – 210.

STARK, T. D.; EID, H. T.; EVANS, W. D. & SHERRY, P. E. Municipal solid waste slope failures II: stability analysis. **J. Geotech. And Geoenviron. Engrg.**, ASCE, v. 126, n. 5, pp. 408 – 419, 2000.

STULTGIS, R. P.; SOYDEMIR, C. & TELGENER, R. J. Predicting landfill settlement. **Geoenvironment 2000: characterization, containment, remediation, and performance in environmental geotechnics**, ASCE GSP No. 46, Y. B. Acar e D. E. Daniel (eds), New Orleans, 1995, pp. 980 – 994.

TIMOSHENKO, S. P. & GOODIER, J. N. **Theory of elasticity**. New York: McGrawhill, 1934.

TOLEDO FILHO, R. D. T. **Estudo da compressibilidade de solos residuais através de ensaios pressiométricos e de prova de carga em estaca instrumentada**. Rio de Janeiro, 1984, 151p. Dissertação de Mestrado, Depto. Eng. Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

VALERO, S. **Geo-environmental properties and long-term deformation parameters of solid waste**. Morgan, West Virginia, EUA, 1994. M.Sc. Thesis, College of Engineering, West Virginia University, Morgan.

VAN INPE, W. F. Environmental geotechnics: ITC 5 activities, state of art. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 3<sup>rd</sup>. 1998. **Proceedings...** Lisbon, Portugal, 1998, v. 4, pp. 1163 – 1187.

VAN WIERINGEN, J. B. M. Relating cone resistance and pressuremeter test results. In: European Symposium on Penetration Testing, 2<sup>nd</sup>. 1982. **Proceedings...** Amsterdam, 1982, pp. 951 – 955.

VILAR, O. M. & CARVALHO, M. F. Shear strength properties of municipal solid waste. In: In: Environmental Geotechnics, 4<sup>th</sup> – 4<sup>th</sup> ICEG, Rio de Janeiro, 2002. **Proceedings...** de Mello & Almeida (eds), Rio de Janeiro, 2002, v. 1, pp. 59 – 64.

WATTS, K. S. & CHARLES, J. A. Settlement of recently placed domestic refuse landfill. **Proc. Instn. Civ. Engrs**, v. 88, pp. 971 – 993, 1990.

WHO – International Reference Center for Waste Disposal. **Methods of analysis of sewage sludge solid wastes and compost**. Switzerland, 1979

WINDLE, D. & WROTH, C. P. An electrical resistivity method for determining volume changes that occur during a pressuremeter test. In: ASCE Special Conference on In Situ Measurements of Soil Properties. 1975. **Proceedings...** North Carolina State University, Raleigh, 1975, v. 1, pp. 497 – 510.

WITHERS, N. J.; SCHAAP, L. H. J & DALTON, J. C. P. 1986. The development of a full displacement pressuremeter. In. Internatinal Symposium on Pressuremeter and its Marine Applications, 2<sup>nd</sup>. 1986. **Proceedings...** Briaud e Audibert (eds), ASTM STP 950, Texan, USA, 1986, pp. 38-56.

WITHERS, N. J.; HOWIE, J.; HUGHES, J. M. O & ROBERTSON, P. K. Performance and analysis of cone pressuremeter tests in sand. **Géotechnique**, v. 39, n. 3, pp. 433 – 454, 1989.

WITHIAM, J. *et al.* Prediction and performance of municipal landfill slope. **Geoenvironment 2000: characterization, containment, remediation, and performance in environmental geotechnics**, ASCE GSP No. 46, Y. B. Acar e D. E. Daniel (eds), New Orleans, 1995, pp. 1005 – 1019.

WROTH, C. P. The interpretation of in situ soil tests. **Géotechnique**, v. 34, n. 4, pp. 449-489, 1984.

WROTH, C. P. & HUGHES, J. M. O. An instrument for the in situ measurement of the properties of soft clays. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundatino Engineering, 8<sup>th</sup>. 1973, **Proceedings...** Moscow, 1973, v. 1.2, pp. 487 – 494.

YEN, B. C. & SCANLON, B. S. Sanitary landfill settlement rates. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 101, n. GT5, pp. 475 – 487, 1975

YU, H. S. **Cavity expansion theory and its application to the analysis of pressuremeters**. Oxford, UK, 1990. DPhil Thesis, University of Oxford.

\_\_\_\_\_. State parameter from self-boring pressuremeter tests in sand. **J. Geotech. Engng.**, ASCE, v. 120, n. 12, pp. 2118 – 2135, 1994.

\_\_\_\_\_. Interpretation of pressuremeter tests in sand. **Géotechnique**, v. 46, n. 1, pp. 17 – 31, 1996.

YU, H. S. & HOULSBY, G. T. A large strain analytical solution for cavity contraction in dilatant soils. **Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.**, v. 19, pp. 793 – 811, 1995.

YU, H. S.; SCHNAID, F. & COLLINS, I. F. Analysis of cone pressuremeter tests in sands. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v. 122, n. 8, pp. 623 – 632, 1996.

ZUIDBERG, H. M. & POST, M. L. The cone pressuremeter: an efficient way of pressuremeter testing. In: International Symposium on Pressuremeter Testing – ISP4, 4<sup>th</sup>. 1995. **Proceedings....**, Sherbrook, Canada, 1995, pp. 387 – 394.

## Apêndice I – Avaliação do Desempenho dos SMD

Tabela 20 – Avaliação da performance do Het 1 – sonda SP1.

Dest mm	Leitura 1		Leitura 2		Leitura 3		Média		Repetibilidade				Histerese (todos os pts)			
	mV	ΔmV	mV	ΔmV	mV	ΔmV	mV	ΔmV	Δmax	Δmin	dif	(%)	Δmax	Δmin	dif	% FS
0.00	3784.03	0.00	3785.56	0.00	3784.64	0.00	3784.74	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	-1.53	1.53	0.04
3.81	3378.1	405.93	3390.31	395.25	3381.46	403.18	3383.29	401.45	405.93	395.25	10.68	97.34	405.93	392.50	13.43	0.31
7.62	2982.24	801.79	2992.31	793.25	2985.56	799.08	2986.70	798.04	801.79	793.25	8.54	98.93	801.79	793.25	8.54	0.20
11.43	2606.52	1177.51	2613.84	1171.72	2604.08	1180.56	2608.15	1176.60	1180.56	1171.72	8.84	99.25	1187.58	1171.72	15.86	0.37
15.24	2237.52	1546.51	2246.67	1538.89	2240.26	1544.38	2241.48	1543.26	1546.51	1538.89	7.62	99.51	1549.26	1538.89	10.37	0.24
19.05	1883.16	1900.87	1890.46	1895.10	1884.69	1899.95	1886.10	1898.64	1900.87	1895.10	5.77	99.70	1904.22	1895.10	9.12	0.21
22.86	1526.68	2257.35	1531.25	2254.31	1523.93	2260.71	1527.29	2257.46	2260.71	2254.31	6.40	99.72	2260.71	2252.94	7.77	0.18
26.67	1163.17	2620.86	1167.13	2618.43	1158.59	2626.05	1162.96	2621.78	2626.05	2618.43	7.62	99.71	2630.33	2618.43	11.90	0.28
30.48	789.59	2994.44	787.14	2998.42	785.62	2999.02	787.45	2997.29	2999.02	2994.44	4.58	99.85	3005.44	2994.44	11.00	0.26
34.29	387.32	3396.71	384.26	3401.30	378.46	3406.18	383.35	3401.40	3406.18	3396.71	9.47	99.72	3408.73	3396.71	12.02	0.28
38.10	-46.09	3830.12	-40.90	3826.46	-45.48	3830.12	-44.16	3828.90	3830.12	3826.46	3.66	99.90	3839.88	3826.46	13.42	0.31
41.91	-492.92	4276.95	-490.48	4276.04	-490.00	4274.64	-491.13	4275.88	4276.95	4274.64	2.31	99.95	4276.95	4274.64	2.31	0.05
41.91	-492.00	4276.03	-490.9	4276.46	-490.00	4274.64	-490.97	4275.71	4276.46	4274.64	1.82	99.96	Histerese máxima = 0.37			
38.10	-48.22	3832.25	-50.67	3836.23	-55.24	3839.88	-51.38	3836.12	3839.88	3832.25	7.63	99.80				
34.29	386.40	3397.63	376.83	3408.73	378.77	3405.87	380.67	3404.08	3408.73	3397.63	11.10	99.67				
30.48	784.70	2999.33	780.12	3005.44	779.51	3005.13	781.44	3003.30	3005.44	2999.33	6.11	99.80				
26.67	1164.39	2619.64	1155.23	2630.33	1159.81	2624.83	1159.81	2624.93	2630.33	2619.64	10.69	99.59				
22.86	1531.09	2252.94	1525.45	2260.11	1524.84	2259.80	1527.13	2257.62	2260.11	2252.94	7.17	99.68				
19.05	1886.52	1897.51	1884.08	1901.48	1880.42	1904.22	1883.67	1901.07	1904.22	1897.51	6.71	99.65				
15.24	2241.48	1542.55	2240.26	1545.30	2235.38	1549.26	2239.04	1545.70	1549.26	1542.55	6.71	99.57				
11.43	2605.91	1178.12	2602.25	1183.31	2597.06	1187.58	2601.74	1183.00	1187.58	1178.12	9.46	99.20				
7.62	2989.56	794.47	2989.98	795.58	2982.85	801.79	2987.46	797.28	801.79	794.47	7.32	99.08				
3.81	3391.53	392.50	3386.03	399.53	3385.73	398.91	3387.76	396.98	399.53	392.50	7.03	98.23				
0.00	3785.56	-1.53	3785.56	0.00	3785.86	-1.22	3785.66	-0.92	0.00	-1.53	1.53	-				

Tabela 21 – Avaliação da performance do Het 2 – sonda SP1.

Dest mm	Leitura 1		Leitura 2		Leitura 3		Leitura 4		Média		Repetibilidade				Histerese (todos os pts)			
	mV	ΔmV	mV	ΔmV	mV	ΔmV	mV	ΔmV	mV	ΔmV	Δmax	Δmin	dif	(%)	Δmax	Δmin	dif	% FS
0.00	3784.03	0.00	3786.17	0.00	3779.15	0.00	3778.54	0.00	3781.97	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	3.97	-4.26	8.23	0.19
3.81	3428.15	355.88	3502.32	283.85	3441.28	337.87	3403.13	375.41	3443.72	338.25	375.41	283.85	91.56	72.93	381.43	283.85	97.58	2.31
7.62	3054.27	729.76	3131.49	654.68	3059.46	719.69	3027.41	751.13	3068.16	713.82	751.13	654.68	96.45	86.49	751.13	654.68	96.45	2.28
11.43	2703.27	1080.76	2729.88	1056.29	2699	1080.15	2678.85	1099.69	2702.75	1079.22	1099.69	1056.29	43.40	95.98	1099.69	1052.07	47.62	1.13
15.24	2353.8	1430.23	2424.00	1362.17	2348.17	1430.98	2332.74	1445.80	2364.68	1417.30	1445.80	1362.17	83.63	94.10	1449.15	1362.17	86.98	2.06
19.05	2003.11	1780.92	2075.14	1711.03	2002.5	1776.65	1982.36	1796.18	2015.78	1766.20	1796.18	1711.03	85.15	95.18	1796.18	1711.03	85.15	2.02
22.86	1649.37	2134.66	1722.32	2063.85	1648.76	2130.39	1635.33	2143.21	1663.95	2118.03	2143.21	2063.85	79.36	96.25	2145.35	2063.85	81.50	1.93
26.67	1279.15	2504.88	1349.96	2436.21	1275.18	2503.97	1273.65	2504.89	1294.49	2487.49	2504.89	2436.21	68.68	97.24	2513.43	2436.21	77.22	1.83
30.48	895.19	2888.84	958.99	2827.18	905.57	2873.58	885.73	2892.81	911.37	2870.60	2892.81	2827.18	65.63	97.71	2897.70	2827.18	70.52	1.67
34.29	482.85	3301.18	550.91	3235.26	471.86	3307.29	465.45	3313.09	492.77	3289.21	3313.09	3235.26	77.83	97.63	3315.53	3235.26	80.27	1.90
38.10	29.61	3754.42	99.5	3686.67	21.98	3757.17	20.14	3758.40	42.81	3739.17	3758.40	3686.67	71.73	98.08	3758.40	3686.67	71.73	1.70
41.91	-453.55	4237.58	-386.09	4172.26	-458.74	4237.89	-460.87	4239.41	-439.81	4221.79	4239.41	4172.26	67.15	98.41	4246.38	4172.26	74.12	1.76
41.91	-454.16	4238.19	-387.01	4173.18	-455.68	4234.83	-467.84	4246.38	-441.17	4223.15	4246.38	4173.18	73.20	98.27	Histerese máxima = 2.31			
38.10	33.57	3750.46	93.4	3692.77	26.55	3752.60	21.67	3756.87	43.80	3738.18	3756.87	3692.77	64.10	98.29				
34.29	480.71	3303.32	540.84	3245.33	474.61	3304.54	463.01	3315.53	489.79	3292.18	3315.53	3245.33	70.20	97.87				
30.48	891.53	2892.50	944.33	2841.84	889.09	2890.06	880.84	2897.70	901.45	2880.53	2897.70	2841.84	55.86	98.06				
26.67	1279.15	2504.88	1333.78	2452.39	1270.3	2508.85	1265.11	2513.43	1287.09	2494.89	2513.43	2452.39	61.04	97.55				
22.86	1640.83	2143.20	1697.9	2088.27	1637.47	2141.68	1633.19	2145.35	1652.35	2129.63	2145.35	2088.27	57.08	97.32				
19.05	1995.79	1788.24	2047.37	1738.80	1987.24	1791.91	1982.66	1795.88	2003.27	1778.71	1795.88	1738.80	57.08	96.79				
15.24	2343.43	1440.60	2390.73	1395.44	2330	1449.15	2336.10	1442.44	2350.07	1431.91	1449.15	1395.44	53.71	96.25				
11.43	2690.45	1093.58	2734.1	1052.07	2682.2	1096.95	2683.13	1095.41	2697.47	1084.50	1096.95	1052.07	44.88	95.86				
7.62	3039.31	744.72	3090.59	695.58	3045.11	734.04	3043.89	734.65	3054.73	727.25	744.72	695.58	49.14	93.24				
3.81	3402.6	381.43	3456.23	329.94	3413.2	365.95	3423.27	355.27	3423.83	358.15	381.43	329.94	51.49	85.62				
0.00	3780.06	3.97	3786.17	0.00	3779.15	0.00	3782.80	-4.26	3782.05	-0.07	3.97	-4.26	8.23	-				



Tabela 24 – Avaliação da performance do Het 1 – sonda SP2.

Desl mm	Leitura 1		Leitura 2		Leitura 3		Leitura 3		Média		Repetibilidade				Histerese (todos os pts)			
	mV	AmV	mV	AmV	mV	AmV	mV	AmV	mV	AmV	Amax	Amin	dif	(%)	Amax	Amin	dif	% FS
0.00	3787.39	0.00	3785.86	0.00	3786.17	0.00	3782.51	0.00	3785.48	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	22.29	0.00	22.29	0.44
3.81	3285.92	501.47	3270.66	515.20	3314.92	471.25	3269.54	512.97	3285.26	500.22	515.20	471.25	43.95	91.21	536.87	471.25	65.62	1.31
7.62	2805.82	981.57	2785.37	1000.49	2831.16	955.01	2780.80	1001.71	2800.79	984.70	1001.71	955.01	46.70	95.26	1008.12	955.01	53.11	1.06
11.43	2359.91	1427.48	2347.7	1438.16	2332.05	1454.12	2341.29	1441.22	2345.24	1440.25	1454.12	1427.48	26.64	98.15	1454.12	1424.74	29.38	0.59
15.24	1945.43	1841.96	1932.3	1853.56	1972.29	1813.88	1926.81	1855.70	1944.21	1841.28	1855.70	1813.88	41.82	97.73	1882.86	1813.88	68.98	1.37
19.05	1529.42	2257.97	1527.29	2258.57	1552.67	2233.50	1508.67	2273.84	1529.51	2255.97	2273.84	2233.50	40.34	98.21	2303.28	2233.50	69.78	1.39
22.86	1120.74	2666.65	1117.69	2668.17	1141.5	2644.67	1093.58	2688.93	1118.38	2667.11	2688.93	2644.67	44.26	98.34	2703.28	2644.67	58.61	1.17
26.67	705.35	3082.04	690.39	3095.47	720	3066.17	680.71	3101.80	699.11	3086.37	3101.80	3066.17	35.63	98.85	3121.42	3066.17	55.25	1.10
30.48	270.11	3517.28	262.48	3523.38	285.07	3501.10	248.14	3534.37	266.45	3519.03	3534.37	3501.10	33.27	99.05	3554.82	3501.10	53.72	1.07
34.29	-185.57	3972.96	-192.54	3978.40	-170.31	3956.48	-214.26	3996.77	-190.67	3976.15	3996.77	3956.48	40.29	98.99	4013.56	3956.48	57.08	1.14
38.10	-680.01	4467.40	-685.20	4471.06	-672.38	4458.55	-710.84	4493.35	-687.11	4472.59	4493.35	4458.55	34.80	99.22	4512.27	4458.55	53.72	1.07
41.91	-1226.04	5013.43	-1222.35	5008.21	-1217.80	5003.97	-1260.84	5043.35	-1231.76	5017.24	5043.35	5003.97	39.38	99.22	5044.26	5003.97	40.60	0.81
41.91	-1225.04	5012.43	-1228.4	5014.26	-1217.49	5003.66	-1261.75	5044.26	-1233.17	5018.65	5044.26	5003.66	40.60	99.19	Histerese máxima = 1.39			
38.10	-695.89	4483.28	-700.46	4486.32	-685.51	4471.68	-729.76	4512.27	-702.91	4488.39	4512.27	4471.68	40.59	99.10				
34.29	-203.58	3990.97	-207.85	3993.71	-191.37	3977.54	-231.05	4013.56	-208.46	3993.95	4013.56	3977.54	36.02	99.10				
30.48	259.02	3528.37	250.27	3535.59	271.64	3514.53	227.69	3554.82	252.16	3533.33	3554.82	3514.53	40.29	98.86				
26.67	687.34	3100.05	679.1	3106.76	702.91	3083.26	661.09	3121.42	682.61	3102.87	3121.42	3083.26	38.16	98.77				
22.86	1097.85	2689.54	1099.07	2686.79	1117.08	2669.09	1079.23	2703.28	1098.31	2687.18	2703.28	2669.09	34.19	98.73				
19.05	1502.87	2284.52	1508.97	2276.89	1525.15	2261.02	1479.23	2303.28	1504.06	2281.43	2303.28	2261.02	42.26	98.15				
15.24	1913.99	1873.40	1913.69	1872.17	1936.58	1849.59	1899.65	1882.86	1915.98	1869.51	1882.86	1849.59	33.27	98.22				
11.43	2338.85	1448.54	2340.98	1444.88	2361.43	1424.74	2329.69	1452.82	2342.74	1442.75	1452.82	1424.74	28.08	98.05				
7.62	2783.24	1004.15	2785.68	1000.18	2807.65	978.52	2774.39	1008.12	2787.74	997.74	1008.12	978.52	29.60	97.03				
3.81	3253.88	533.51	3253.27	532.59	3278.29	507.88	3245.64	536.87	3257.77	527.71	536.87	507.88	28.99	94.51				
0.00	3771.21	16.18	3775.49	10.37	3782.51	3.66	3760.22	22.29	3772.36	13.13	22.29	3.66	18.63	-				

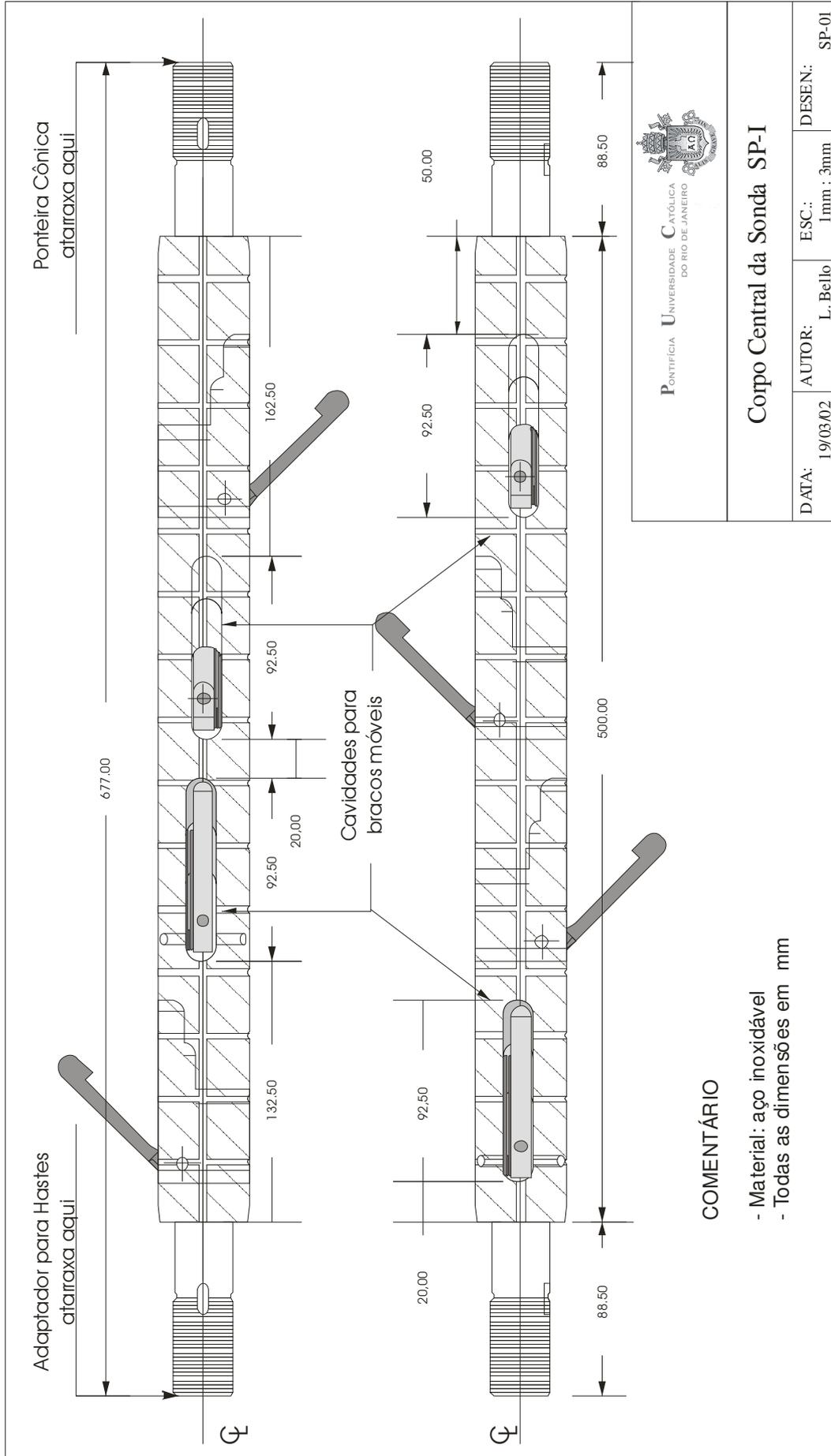
Tabela 25 – Avaliação da performance do Het 2 – sonda SP2.

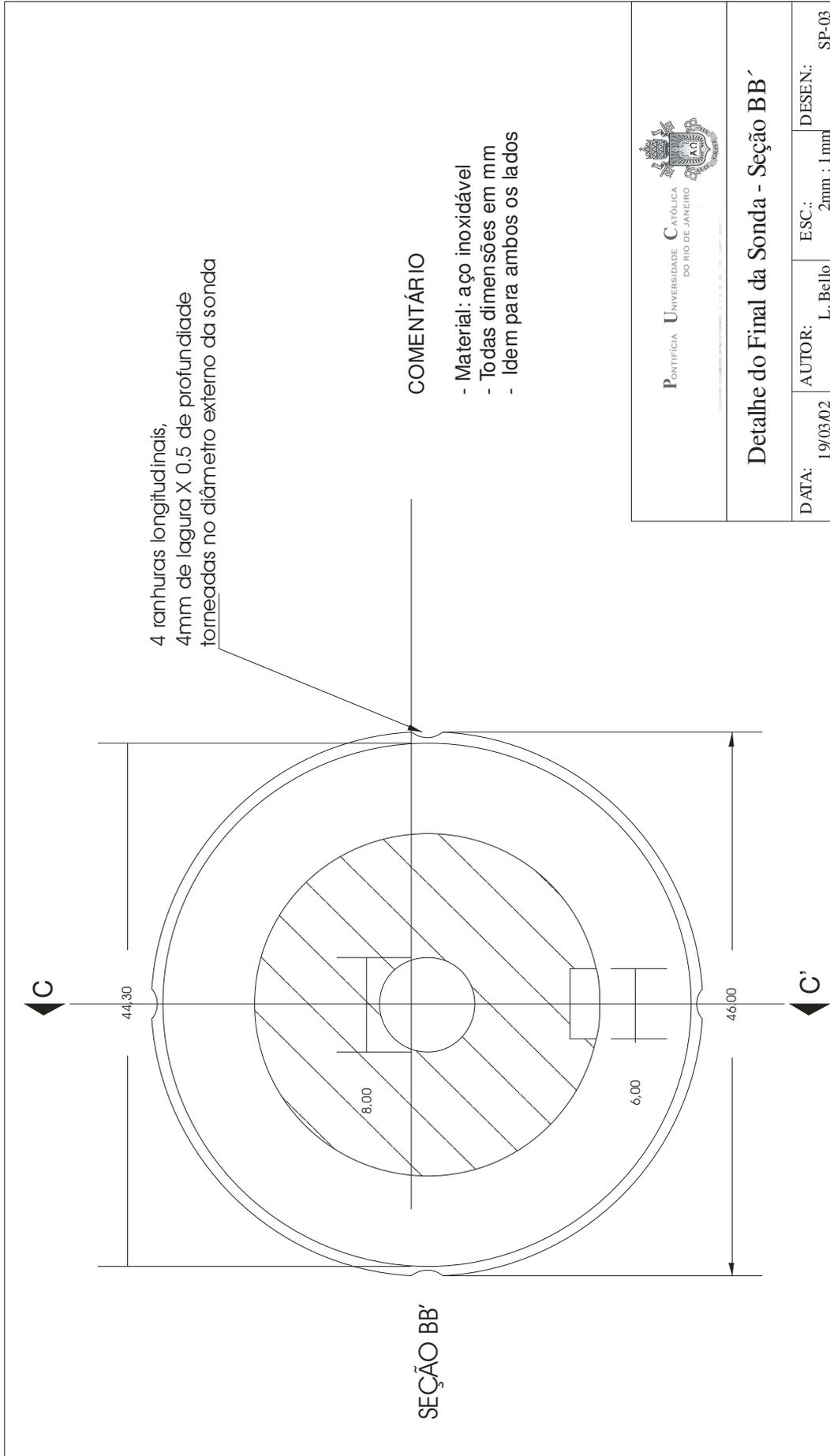
Desl mm	Leitura 1		Leitura 2		Leitura 3		Leitura 3		Média		Repetibilidade				Histerese (todos os pts)			
	mV	AmV	mV	AmV	mV	AmV	mV	AmV	mV	AmV	Amax	Amin	dif	(%)	Amax	Amin	dif	% FS
0.00	3788.3	0.00	3788	0.00	3788.61	0.00	3789.53	0.00	3788.61	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.30	-1.22	1.52	0.04
3.81	3311.26	477.04	3322.24	465.76	3318.58	470.03	3392.44	397.09	3336.13	452.48	477.04	397.09	79.95	82.33	477.04	381.83	95.21	2.24
7.62	2863.51	924.79	2872.05	915.95	2877.85	910.76	2943.47	846.06	2889.22	899.39	924.79	846.06	78.73	91.25	924.79	840.26	84.53	1.98
11.43	2438.65	1349.65	2444.15	1343.85	2456.96	1331.65	2515.87	1273.66	2463.91	1324.70	1349.65	1273.66	75.99	94.26	1349.65	1262.36	87.29	2.05
15.24	2037.91	1750.39	2044.01	1743.99	2063.85	1724.76	2117.57	1671.96	2065.84	1722.78	1750.39	1671.96	78.43	95.45	1750.39	1663.10	87.29	2.05
19.05	1647.23	2141.07	1664.33	2123.67	1687.83	2100.78	1727.81	2061.72	1681.80	2106.81	2141.07	2061.72	79.35	96.23	2141.07	2049.21	91.86	2.16
22.86	1279.45	2508.85	1282.2	2505.80	1309.06	2479.55	1355.76	2433.77	1306.62	2481.99	2508.85	2433.77	75.08	96.98	2511.90	2432.33	79.57	1.87
26.67	899.77	2888.53	903.43	2884.57	929.98	2858.63	976.99	2812.54	927.54	2861.07	2888.53	2812.54	75.99	97.34	2888.84	2803.08	85.76	2.01
30.48	514.89	3273.41	522.22	3265.78	553.05	3235.56	587.54	3201.99	544.43	3244.19	3273.41	3201.99	71.42	97.80	3278.90	3196.81	82.09	1.93
34.29	119.34	3668.96	120.86	3667.14	155.05	3633.56	199.61	3589.92	148.72	3639.90	3668.96	3589.92	79.04	97.83	3674.76	3589.92	84.84	1.99
38.10	-289.95	4078.25	-289.55	4077.55	-248.58	4037.19	-218.84	4008.37	-261.73	4050.34	4078.25	4008.37	69.88	98.27	4086.19	4001.96	84.23	1.98
40.01	-506.65	4294.95	-498.11	4286.11	-451.41	4240.02	-423.94	4213.47	-470.03	4258.64	4294.95	4213.47	81.48	98.09	4294.95	4212.33	82.62	1.94
40.01	-505.13	4293.43	-500.85	4288.85	-447.14	4235.75	-422.80	4212.33	-468.98	4257.59	4293.43	4212.33	81.10	98.10	Histerese máxima = 2.24			
38.10	-297.89	4086.19	-291.17	4079.17	-236.23	4024.84	-212.43	4001.96	-259.43	4048.04	4086.19	4001.96	84.23	97.92				
34.29	113.54	3674.76	120.86	3667.14	170.69	3617.92	199.00	3590.53	151.02	3637.59	3674.76	3590.53	84.23	97.68				
30.48	509.40	3278.90	516.73	3271.27	573.19	3215.42	592.72	3196.81	548.01	3240.60	3278.90	3196.81	82.09	97.47				
26.67	899.46	2888.84	900.68	2887.32	958.37	2830.24	986.45	2803.08	936.24	2852.37	2888.84	2803.08	85.76	96.99				
22.86	1276.4	2511.90	1281.51	2506.49	1340.8	2447.81	1357.20	2432.33	1313.98	2474.63	2511.90	2432.33	79.57	96.78				
19.05	1657.92	2130.38	1660.36	2127.64	1720.18	2068.43	1740.32	2049.21	1694.70	2093.92	2130.38	2049.21	81.17	96.12				
15.24	2039.74	1748.56	2047.06	1740.94	2107.8	1680.81	2126.43	1663.10	2080.26	1708.35	1748.56	1663.10	85.46	95.00				
11.43	2440.79	1347.51	2448.42	1339.58	2507.8	1280.81	2527.17	1262.36	2481.05	1307.57	1347.51	1262.36	85.15	93.49				
7.62	2863.81	924.49	2870.83	917.17	2929.13	859.48	2949.27	840.26	2903.26	885.35	924.49	840.26	84.23	90.49				
3.81	3323.46	464.84	3327.43	460.57	3387.56	401.05	3407.70	381.83	3361.54	427.07	464.84	381.83	83.01	80.56				
0.00	3788	0.30	3788.3	-0.30	3789.83	-1.22	3789.83	-0.30	3788.99	-0.38	0.30	-1.22	1.52	-				

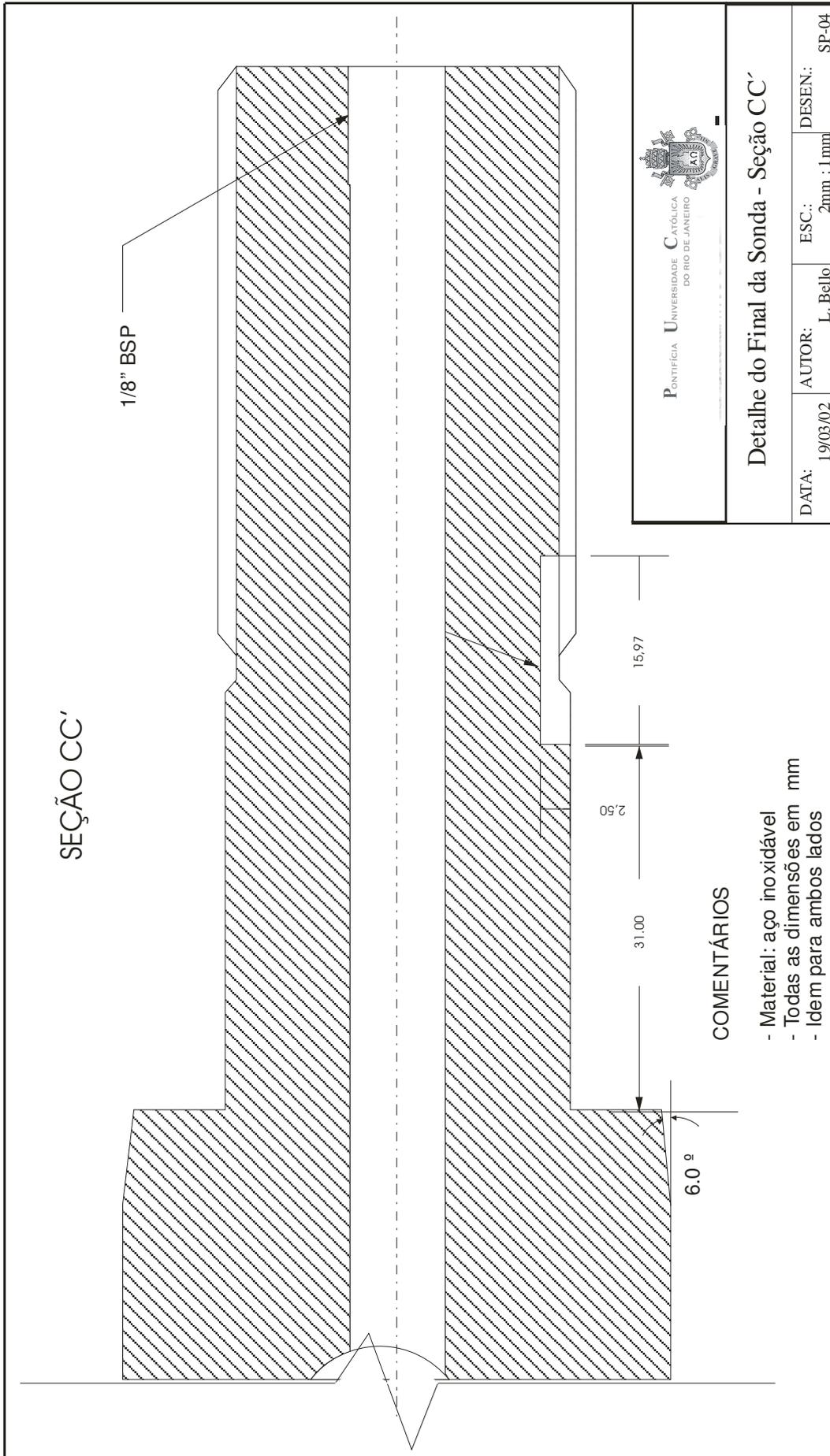
Tabela 26 – Avaliação da performance do Het 3 – sonda SP2.

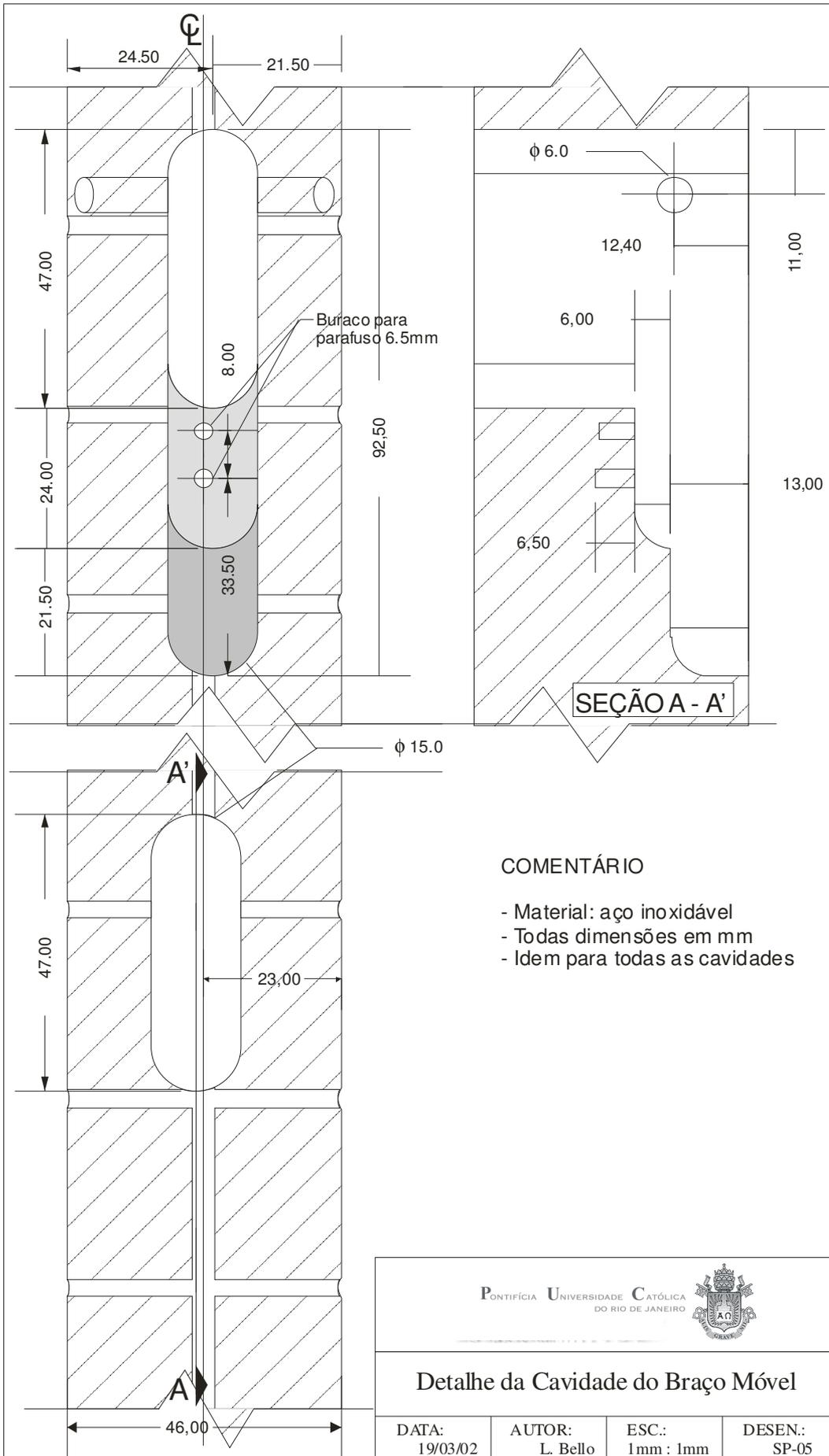
Desl mm	Leitura 1		Leitura 2		Leitura 3		Leitura 4		Média		Repetibilidade				Histerese (todos os pts)			
	mV	AmV	mV	AmV	mV	AmV	mV	AmV	mV	AmV	Amax	Amin	dif	(%)	Amax	Amin	dif	% FS
0.00	3088.76	0.00	3072.8	0.00	3075.94	0.00	3074.41	0.00	3077.98	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	18.10	-2.83	20.93	0.68
3.81	2728.3	360.46	2728.6	344.20	2733.79	342.15	2727.08	347.33	2729.44	348.54	360.46	342.15	18.31	94.75	360.46	329.55	30.91	1.00
7.62	2403.25	685.51	2405.08	667.72	2407.52	668.42	2403.55	670.86	2404.85	673.13	685.51	667.72	17.79	97.36	685.51	648.19	37.32	1.21
11.43	2077.28	1011.48	2078.81	993.99	2083.08	992.86	2081.86	992.55	2080.26	997.72	1011.48	992.55	18.93	98.10	1011.48	959.20	52.28	1.69
15.24	1754.36	1334.40	1756.5	1316.30	1760.77	1315.17	1755.59	1318.82	1756.81	1321.17	1334.40	1315.17	19.23	98.54	1334.40	1315.17	19.23	0.62
19.05	1432.98	1655.78	1438.47	1634.33	1436.33	1639.61	1436.34	1638.07	1436.03	1641.95	1655.78	1634.33	21.45	98.69	1655.78	1590.38	65.40	2.12
22.86	1107.01	1981.75	1107.62	1965.18	1101.82	1974.12	1103.65	1970.76	1105.03	1972.95	1981.75	1965.18	16.57	99.16	1981.75	1923.98	57.77	1.87
26.67	757.54	2331.22	754.79	2318.01	752.96	2322.98	751.13	2323.28	754.11	2323.87	2331.22	2318.01	13.21	99.43	2331.22	2279.55	51.67	

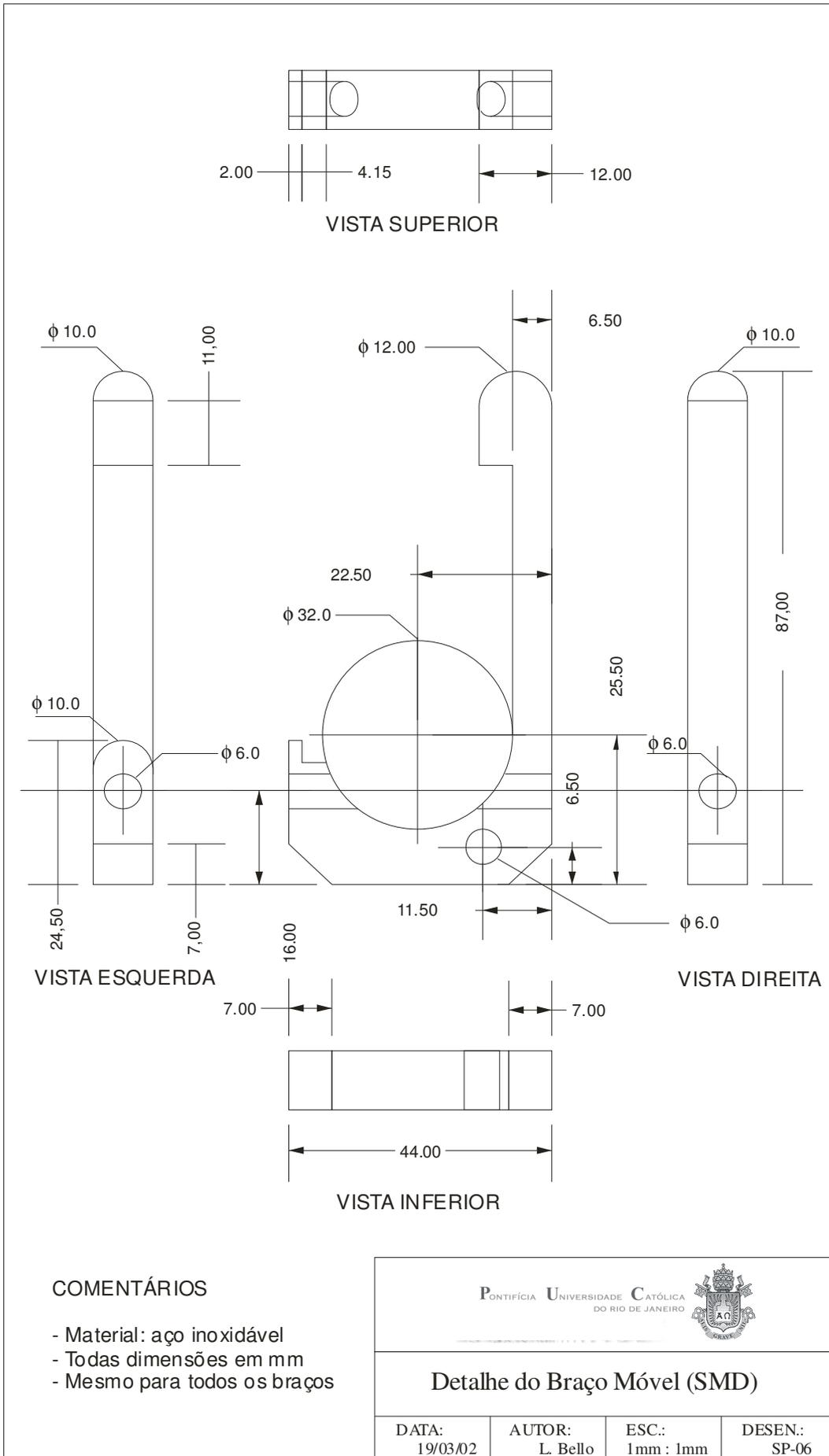
## Apêndice II – Desenhos da Sonda











COMENTÁRIOS

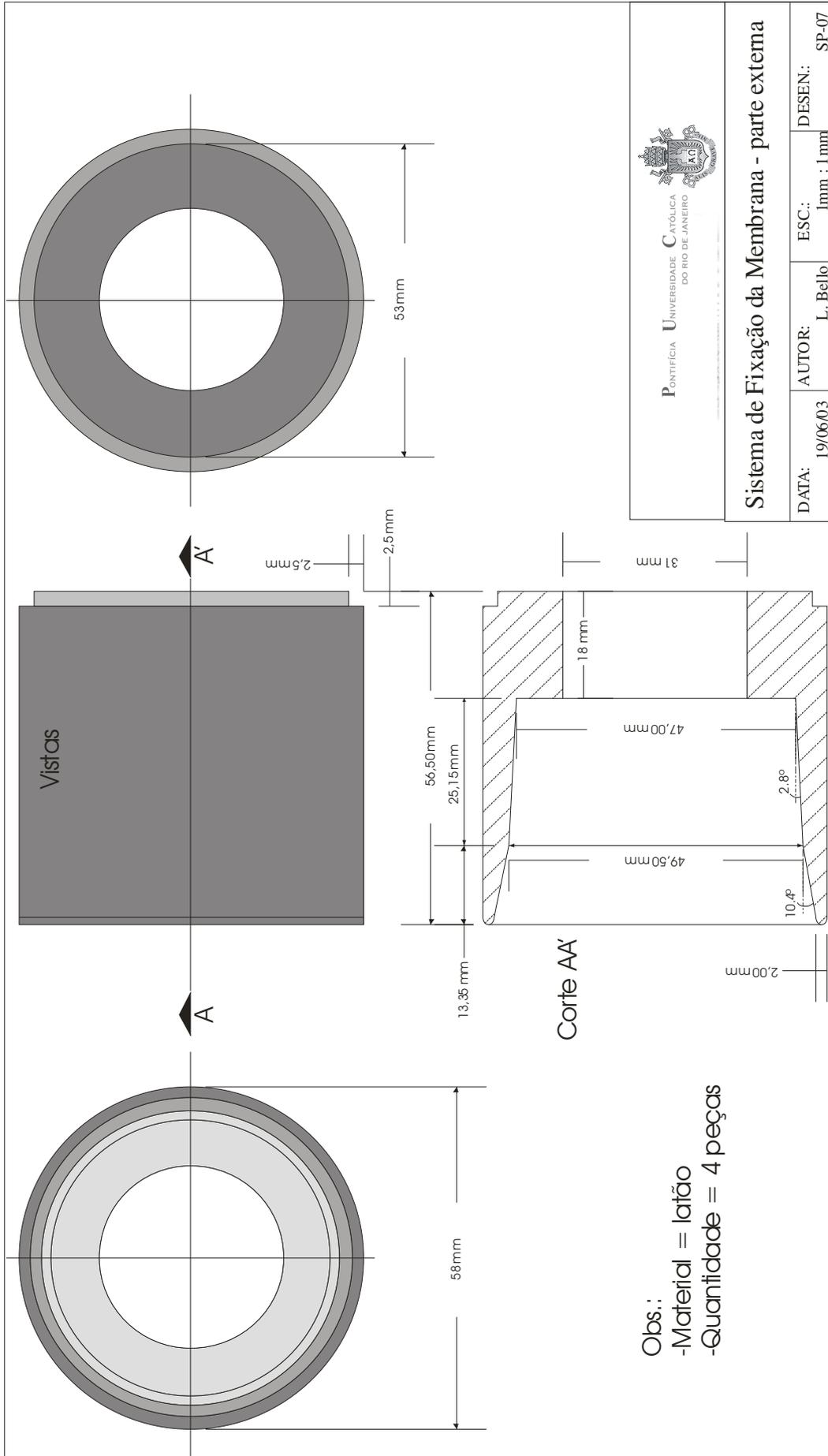
- Material: aço inoxidável
- Todas dimensões em mm
- Mesmo para todos os braços

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO



Detalhe do Braço Móvel (SMD)

DATA: 19/03/02	AUTOR: L. Bello	ESC.: 1mm : 1mm	DESEN.: SP-06
-------------------	--------------------	--------------------	------------------



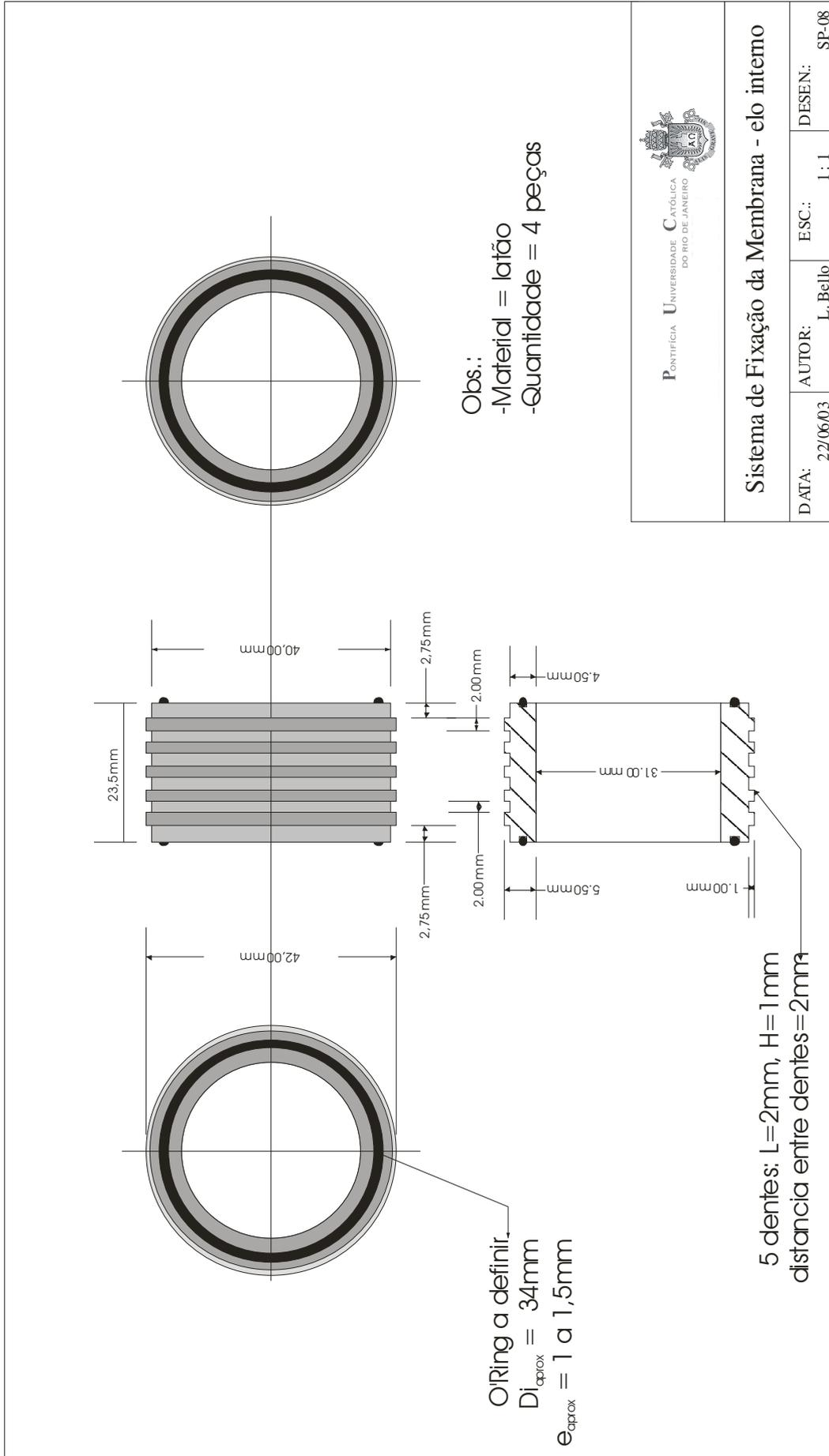
Obs.:  
 -Material = latão  
 -Quantidade = 4 peças

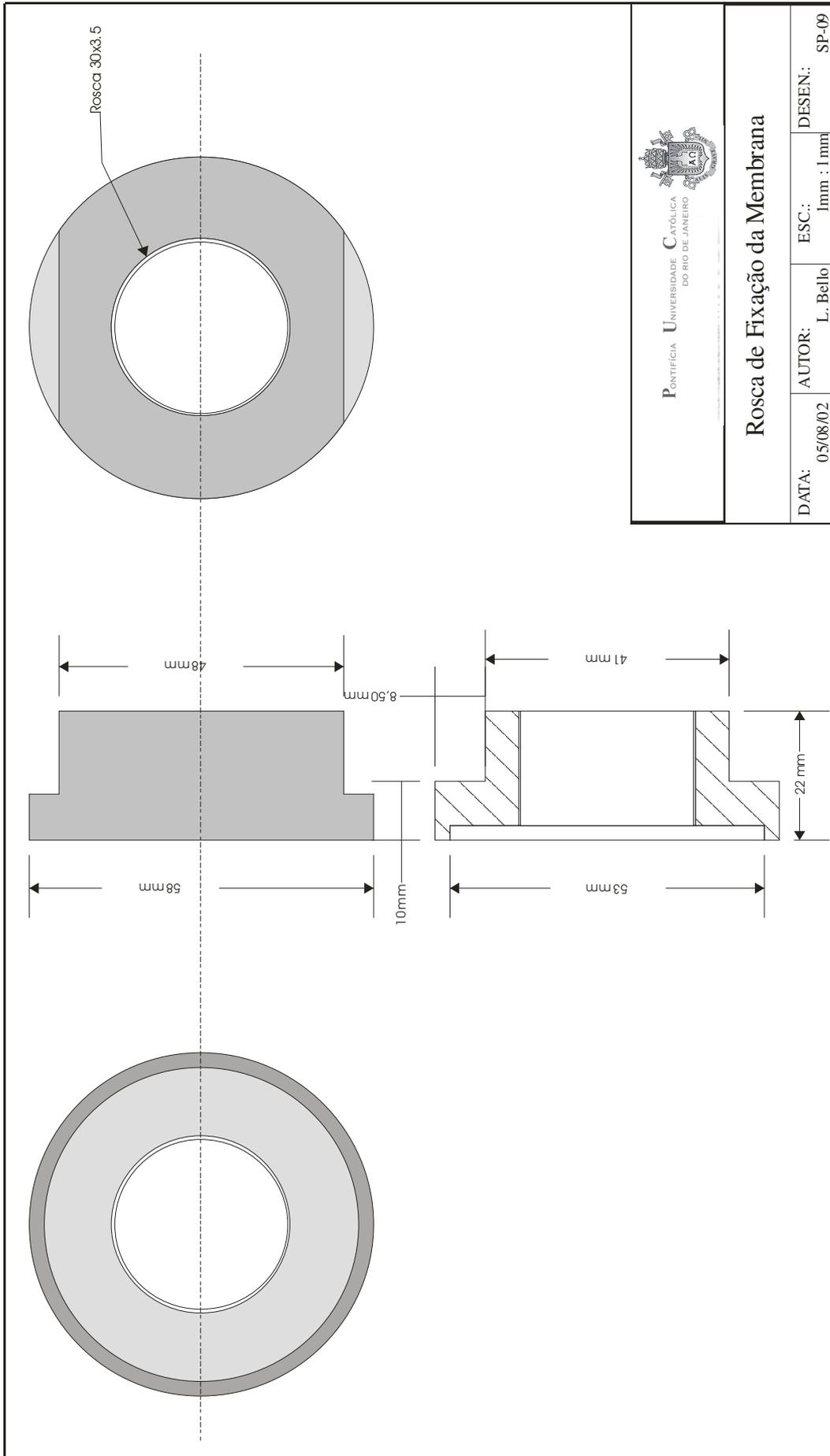


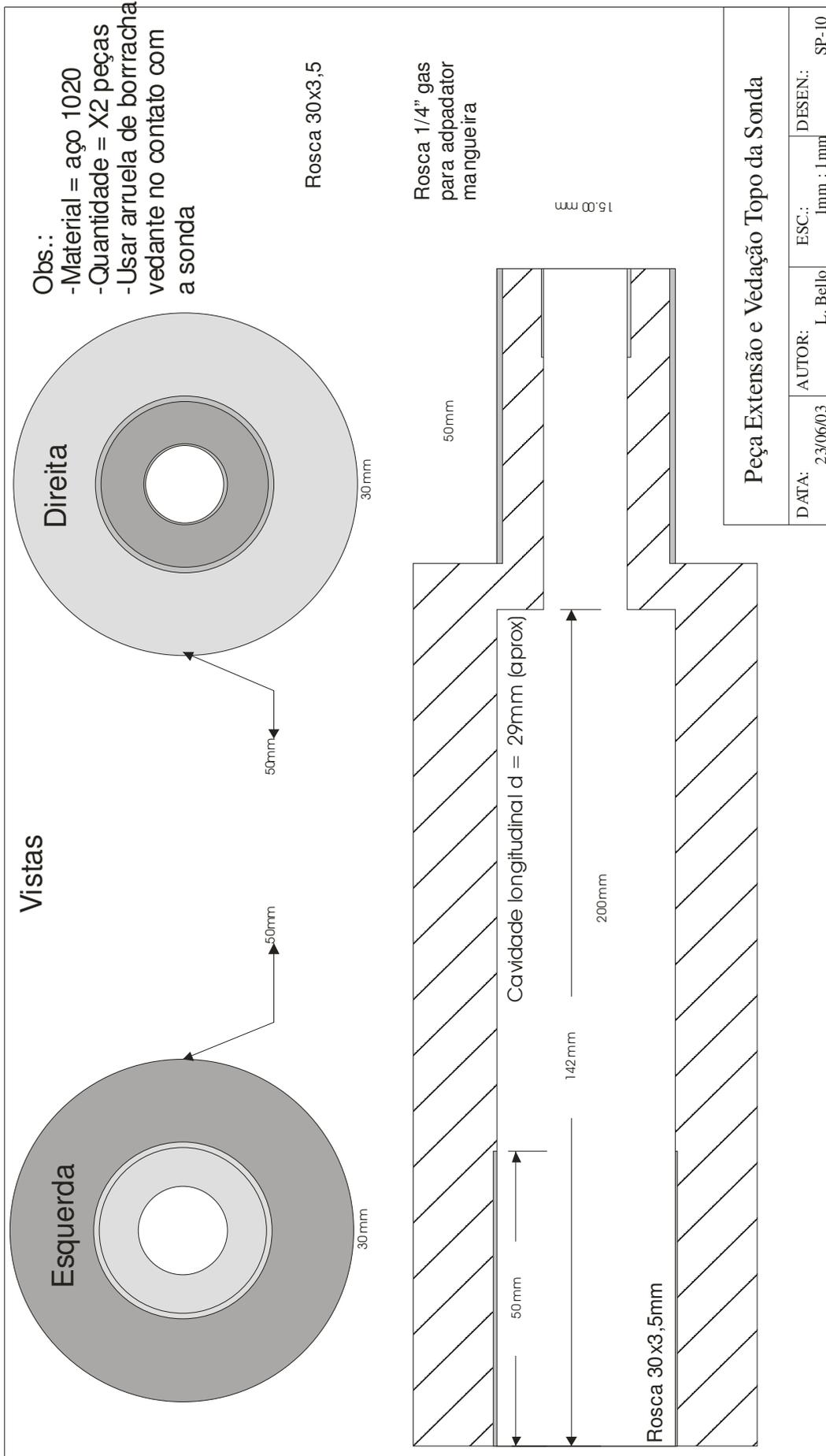
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

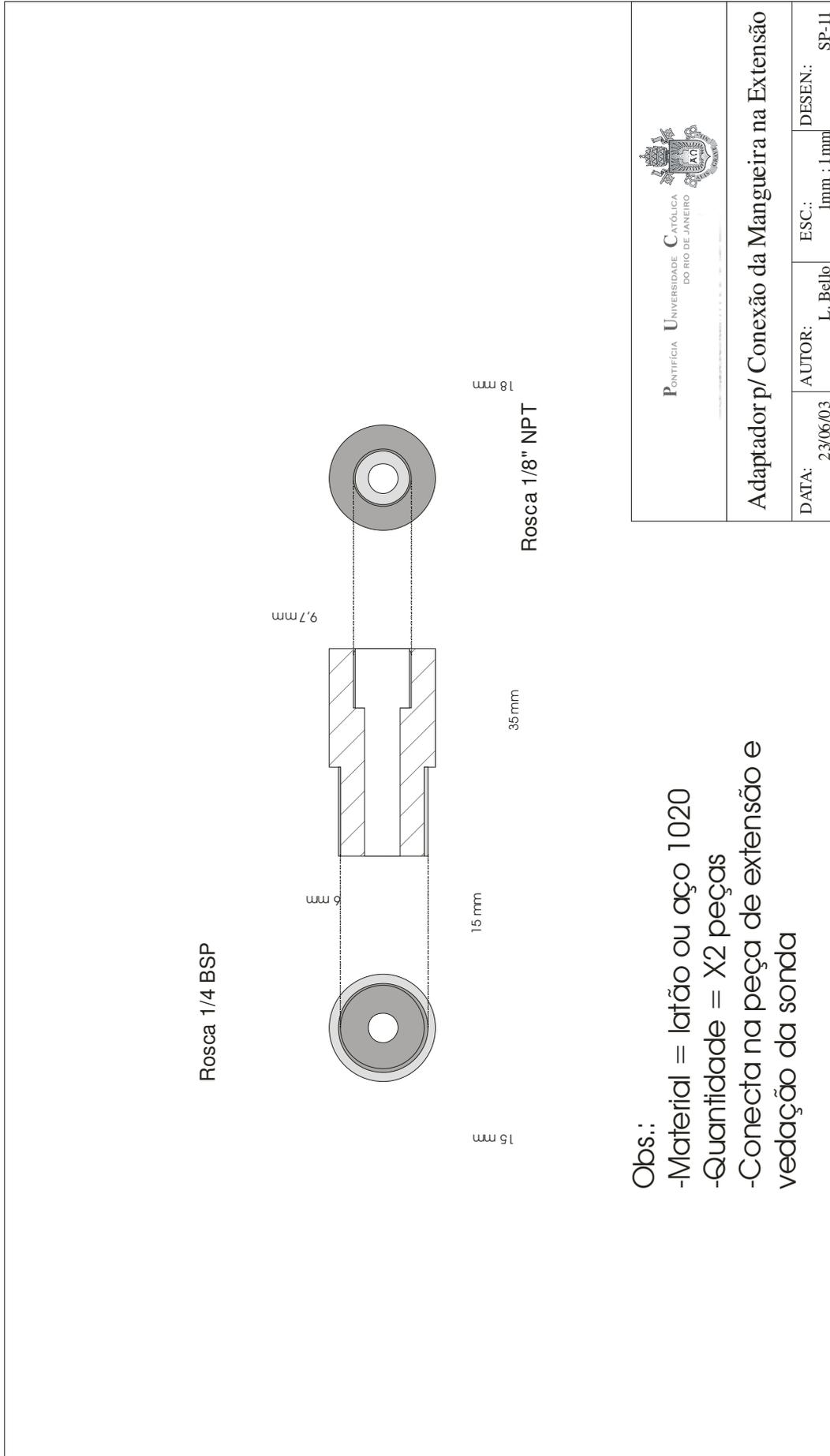
Sistema de Fixação da Membrana - parte externa

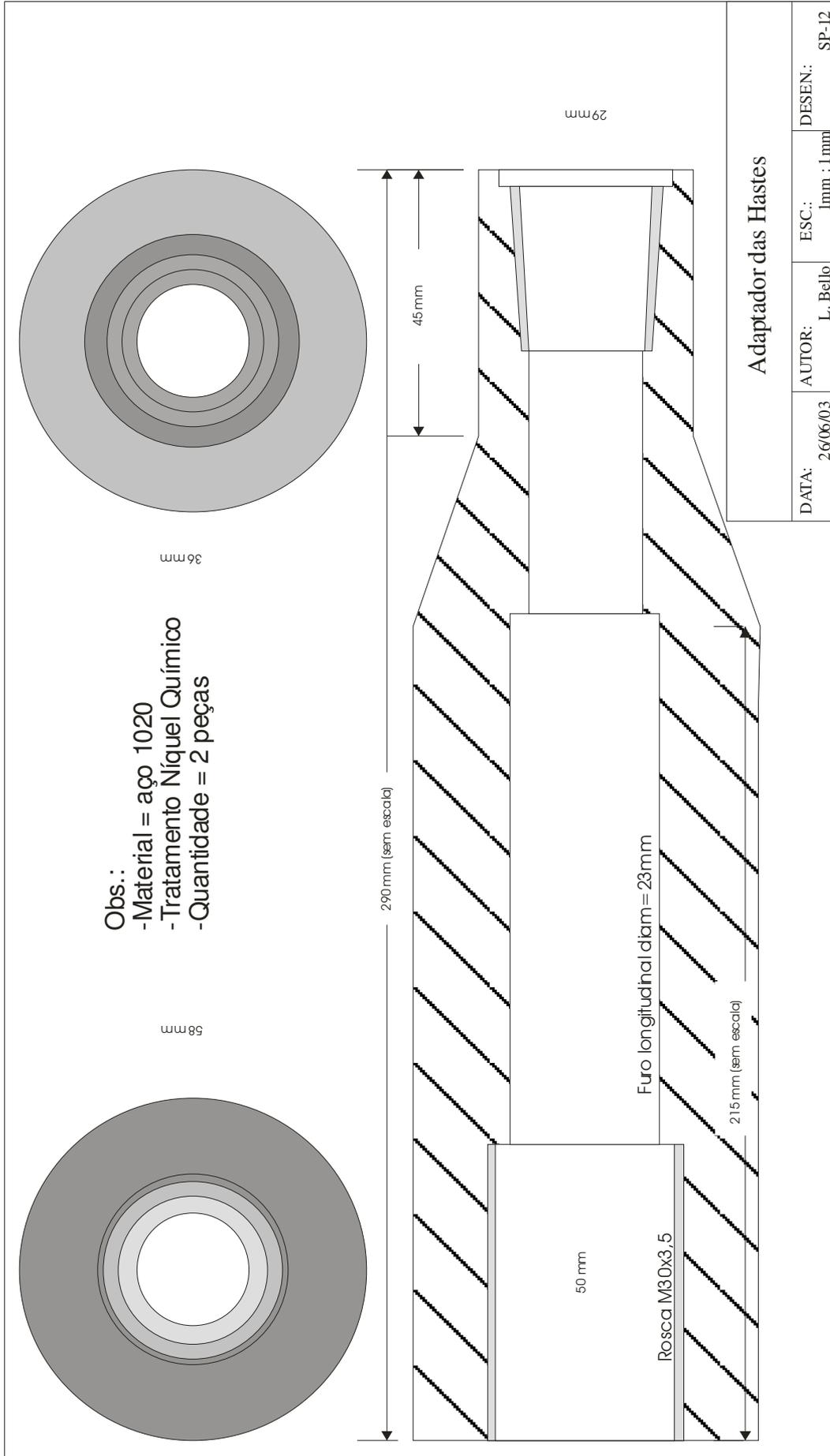
DATA:	AUTOR:	ESC:	DESEN:
19/06/03	L. Bello	1mm : 1mm	SP-07

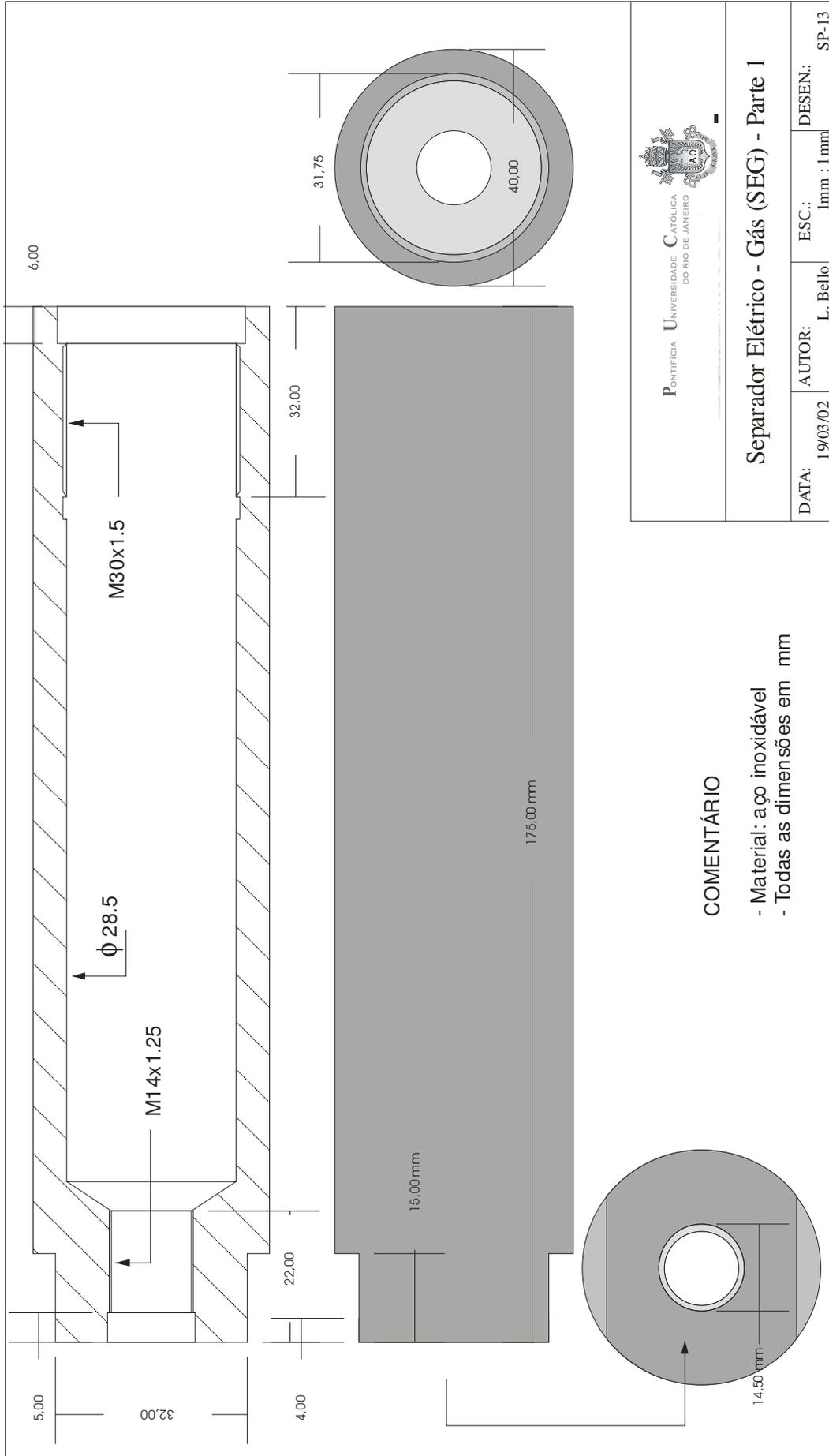


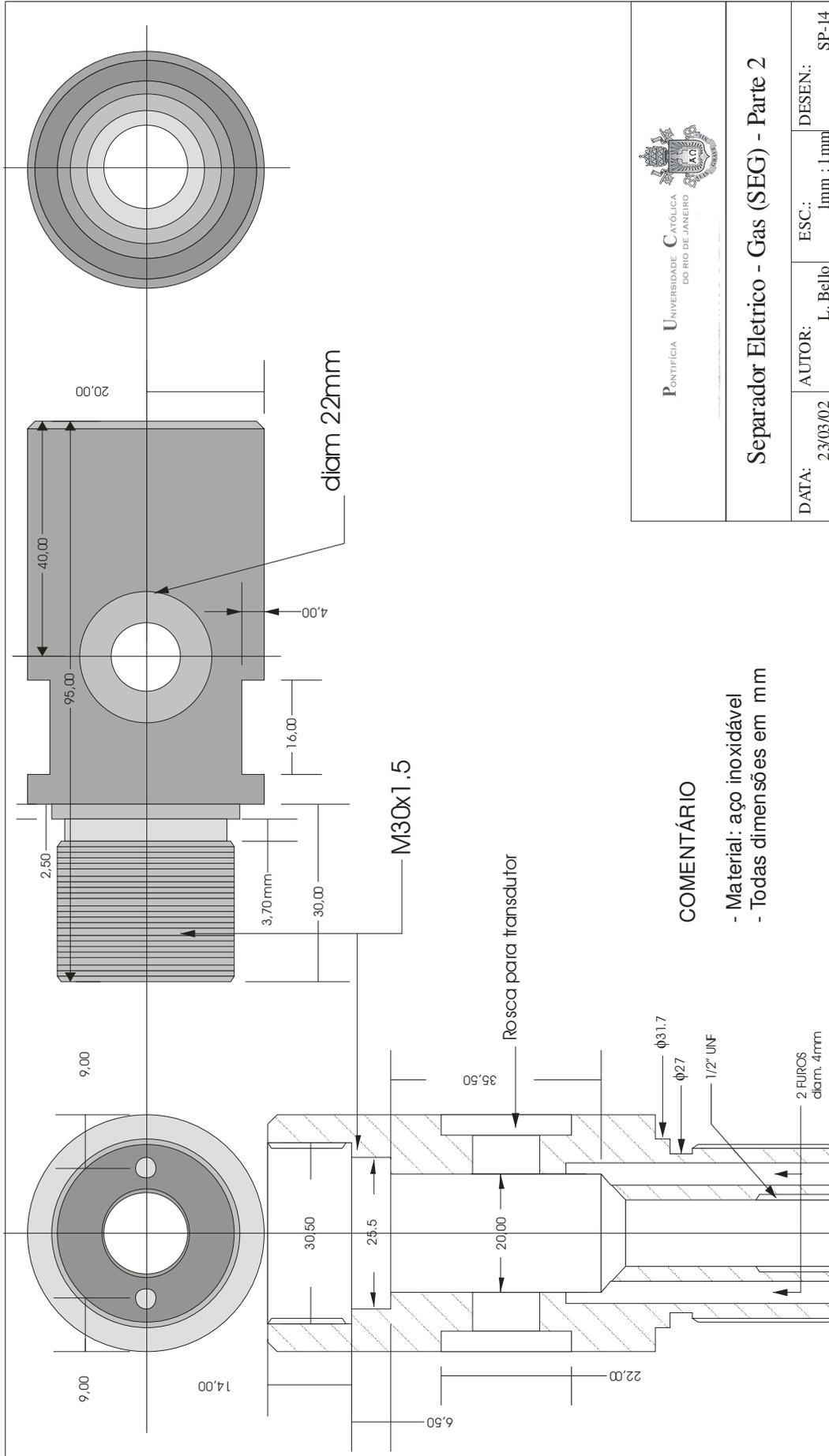


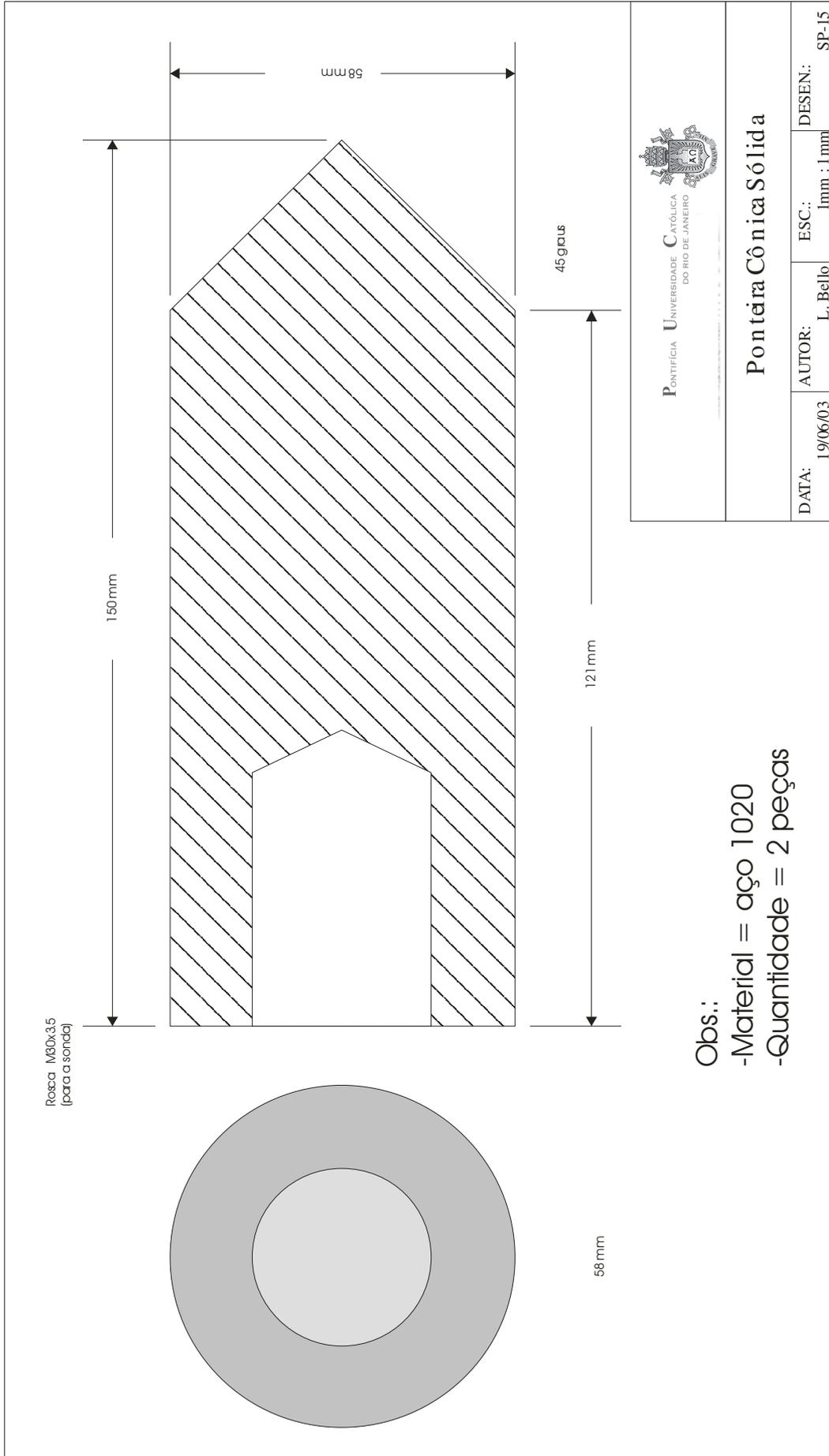












## Anexo I – Laudos de Sondagem SPT



SPT2

<b>PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAÇÃO ( S.P. )</b>				RELATÓRIO TÉCNICO Nº			
				SONDAGEM Nº 02			
				COTA : ____ (m)			
LOCAL : LIXÃO DA MURIBECA. JABOATÃO DOS GUARARAPES / PE.							

POSICÃO DO REVESTIMENTO	MÉTODO DE PERFURAÇÃO	PENETRAÇÃO (GOLPES / 15 cm)			S P	PENETRAÇÃO X PROFUNDIDADE ( GOLPES/30 cm )				PROF. (m)	N.A. (m)	AMOSTRA CONV.	CLASSIFICAÇÃO
		1ª	2ª	3ª		10	20	30	40				
		LAV. / TEMPO ( cm / 10 min. )											
		1	2	4	6					0,30		1	ARGILA SILTOSA COM AREIA FINA E MÉDIA E MUITO POUCA AREIA GROSSA, VERMELHO CLARO (ATERRO).
		4	6	6	12					0,90		2	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM PLÁSTICO, PEDAÇOS DE ESPUMA, MADEIRA E RESTOS DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO, COM AREIA MÉDIA E FINA, MARROM.
		4	5	5	10					1,35		3	
												4	ARGILA SILTOSA COM AREIA FINA E MÉDIA E POUCA AREIA GROSSA, VERMELHO CLARO.
		2	3	3	6					2,45		5	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM MUITO PEDAÇO DE PLÁSTICO, VIDRO E MUITA MATÉRIA ORGÂNICA, COM AREIA MÉDIA E FINA, MARROM.
		4	4	3	7					3,45		6	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM PEDAÇOS DE TECIDOS E COM IMPREGNAÇÕES DE ARGILA, VERMELHA.
		2	4	2	6					4,45		7	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO, COM PEDAÇOS DE PLÁSTICO, VIDRO, COM POUCA MATÉRIA ORGÂNICA, MARROM.
		3	4	4	8					5,45		8	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM PEDAÇOS DE PLÁSTICO, VIDRO E MADEIRA, COM AREIA MÉDIA E FINA, MARROM.
		5	7	6	13					6,45		9	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM MUITO PEDAÇO DE PLÁSTICO, VIDRO, MADEIRA, PIAÇAVA, CASCA DE COCO E MUITA MATÉRIA ORGÂNICA, COM AREIA MÉDIA E FINA, PRETA.
		8	9	9	18					7,45		10	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO E MUITA MATÉRIA ORGÂNICA, PLÁSTICO, VIDRO, POUCO RESTO DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO, E POUCA AREIA FINA E MÉDIA, PRETA.
		7	9	7	16					8,45		11	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM PEDAÇOS DE PLÁSTICO, MADEIRA, FRAGMENTOS DE CERÂMICA COM POUCA AREIA FINA E MÉDIA, PRETA.
		9	5	5	10					9,45		12	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM PEDAÇOS DE PLÁSTICO, POUCA MADEIRA EM DECOMPOSIÇÃO, VIDRO E COM AREIA MÉDIA E FINA, PRETA.
		5	6	6	12					10,45		13	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM PEDAÇOS DE PLÁSTICO, CASCA DE COCO, VIDRO E MADEIRA EM DECOMPOSIÇÃO, COM RESTO DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO E COM AREIA MÉDIA E FINA, PRETA.
		4	4	8	12					11,45		14	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM MUITO PEDAÇO DE MADEIRA, PLÁSTICO, E RESTO DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO, COM AREIA MÉDIA E FINA, PRETA.
		6	6	7	13					12,45		15	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM MUITO PEDAÇO DE PLÁSTICO, MADEIRA, FRAGMENTOS DE OSSOS, COM AREIA MÉDIA E FINA E RESTO DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO, PRETA.
		5	5	6	11					13,45		16	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM MUITO PEDAÇO DE PLÁSTICO E MUITA MATÉRIA ORGÂNICA, COM AREIA MÉDIA E FINA, PRETA.
		13	15	21	36					14,45		17	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM MUITA MATÉRIA ORGÂNICA E POUCO PEDAÇO DE PLÁSTICO, MADEIRA, ESPUMA, COM AREIA MÉDIA E FINA, PRETA.
													LIMITE DA SONDAÇÃO.

PROF. N.A. (m)	TC	TRADO CONCHA	OBSERVAÇÃO	ESCALA :	DESENHO
INICIAL : ____	TH	TRADO HELICOIDAL		1/125	GILVAN
DATA 06/03/04	CL	CIRCULAÇÃO DE LAMA		PERÍODO DE EXECUÇÃO	
FINAL : ____	CA	CIRCULAÇÃO DE DÁGUA		INICIAL	FINAL
DATA 09/03/04	LT	LAVAGEM POR TEMPO		22 / 03 / 2004	22 / 03 / 2004
DADOS	AMOSTRADOR PADRÃO Ø EXTERNO 51 mm Ø INTERNO 35 mm COMPRIMENTO 780 mm		RESP. TÉCNICO		
TÉCNICOS	MARTELO PADRONIZADO PESO 65 kg ALT. DA QUEDA 0,75 m				
	DIÂMETRO NOMINAL DO REVEST. 63,5 mm				

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0016545/CA

SPT3

<b>PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAAGEM ( S.P. )</b>	RELATÓRIO TÉCNICO Nº SONDAAGEM Nº 03 COTA : _____ (m)
LOCAL : <b>LIXÃO DA MURIBECA. JABOATÃO DOS GUARARAPES / PE.</b>	

POSICÃO DO REVESTIMENTO	MÉTODO DE PERFORAÇÃO	PENETRAÇÃO (GOLPES / 15 cm)			S P	PENETRAÇÃO X PROFUNDIDADE (GOLPES/30 cm)				PROF. (m)	N.A. (m)	AMOSTRA CONV.	CLASSIFICAÇÃO
		1ª	2ª	3ª		10	20	30	40				
		LAV. / TEMPO (cm / 10 min.)											
		1	3	3	6					0,30		①	ARGILA SILTOSA COM AREIA FINA MÉDIA E MUITO POUCA AREIA GROSSA, VERMELHO CLARO (ATERRO).
		5	7	6	13					1		②	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO, COM PLÁSTICO, MATÉRIA ORGÂNICA, MADEIRA EM DECOMPOSIÇÃO, CASCA DE CÓCO E COM AREIA MÉDIA E FINA, MARROM.
		6	8	5	13					1,35		③	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM MUITO PLÁSTICO, MATÉRIA ORGÂNICA, RESTO DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO COM AREIA FINA E MÉDIA, MARROM.
		2	2	2	4					2,45		④	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO, COM MUITO RESTO DE MADEIRA, POUCO PLÁSTICO, RESTO DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO E AREIA MÉDIA E FINA, PRETA.
		2	2	3	5					3		⑤	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO, COM MATÉRIA ORGÂNICA, PLÁSTICO, PAPELÃO, PIAÇAVA RESTO DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO, COM AREIA MÉDIA E FINA, PRETA.
		4	4	2	7					4,45		⑥	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO, COM PLÁSTICO, CASCA DE CÓCO, PEDAÇOS DE BORRACHA, RESTO DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO, COM AREIA MÉDIA E FINA, PRETA.
		1	1	1	2					5,45		⑦	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM MUITO PLÁSTICO, PAPELÃO, MADEIRA, CASCA DE CÓCO, VIDRO, RESTO DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO, COM FINA E MÉDIA, PRETA.
		5	4	6	10					6,45		⑧	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO COM PLÁSTICO, PIAÇAVA, PEDAÇOS DE MADEIRA, MATÉRIA ORGÂNICA, RESTO DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO, AREIA MÉDIA COM POUCA AREIA FINA E AREIA GROSSA, PRETA.
		2	3	3	6					7,45		⑨	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO, COM MUITA MATÉRIA ORGÂNICA, POUCO PLÁSTICO, PEDAÇOS DE MADEIRA, MUITO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO, COM AREIA MÉDIA E FINA, PRETA.
		2	3	4	7					8,45		⑩	LIXO EM DECOMPOSIÇÃO, COM PLÁSTICO, PIAÇAVA, PEDAÇOS DE MADEIRA, VIDRO, AREIA FINA E MÉDIA E POUCA AREIA GROSSA, COM MATERIAL DE CONSTRUÇÃO, PRETA.
		6	8	9	17					9,45		⑪	AMOSTRA NÃO COLETADA.
		35,5	.....	.....	35,5					10,45			LIMITE DA SONDAAGEM.
										11			
										12			
										13			
										14			
										15			
										16			
										17			
										18			
										19			

PROF. N.A. (m)	TC	TRADO CONCHA	OBSERVAÇÃO	ESCALA : 1/125	DESENHO GILVAN	
INICIAL : 4,65	TH	TRADO HELICOIDAL		PERÍODO DE EXECUÇÃO		
DATA 10/02/04	CL	CIRCULAÇÃO DE LAMA		INICIAL	FINAL	
FINAL : 8,53	CA	CIRCULAÇÃO DE DÁGUA		19 / 03 / 2004	19 / 03 / 2004	
DATA 10/02/04	LT	LAVAGEM POR TEMPO		RESP. TÉCNICO		
DADOS		AMOSTRADOR PADRÃO Ø EXTERNO 51 mm Ø INTERNO 35 mm COMPRIMENTO 780 mm PESO 65 kg ALT. DA QUEDA 0,75 m DIÂMETRO NOMINAL DO REVEST. 63,5 mm				
TÉCNICOS						

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0016545/CA

