

## 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.

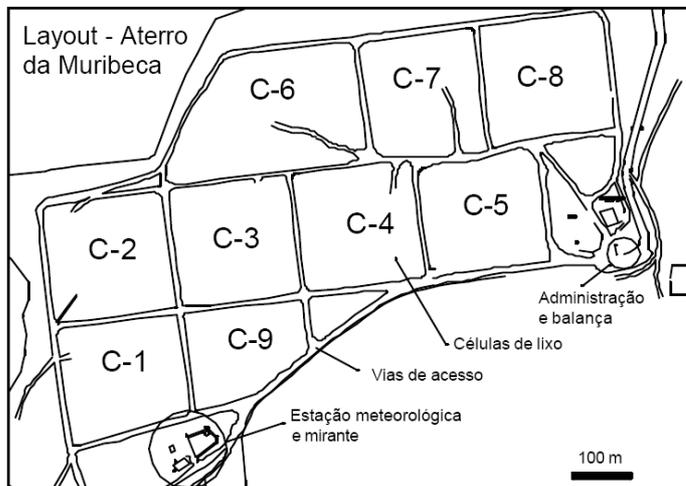


Figura 84 – Desenho esquemático das células do aterro da Muribeca

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

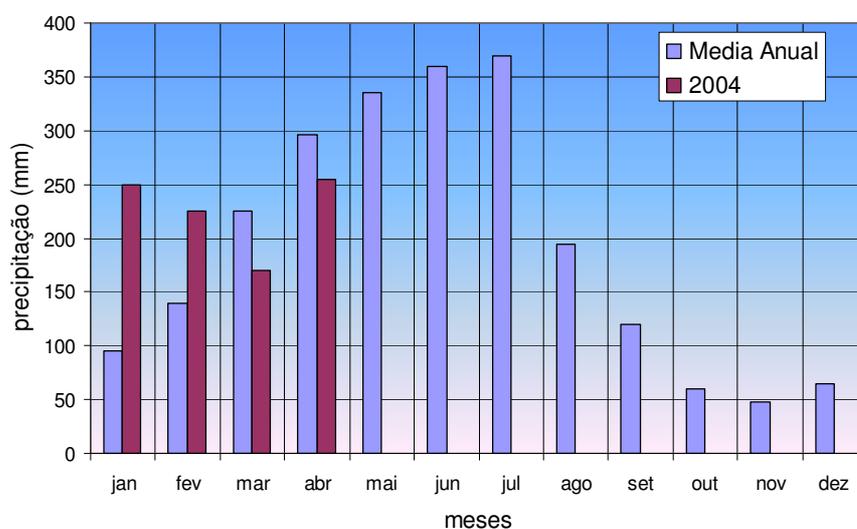


Figura 86 – Média histórica de precipitação na região do aterro da Muribeca (1971 – 2001) e precipitação nos primeiros meses de 2004 (Instituto Nacional de Meteorologia)

### 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.

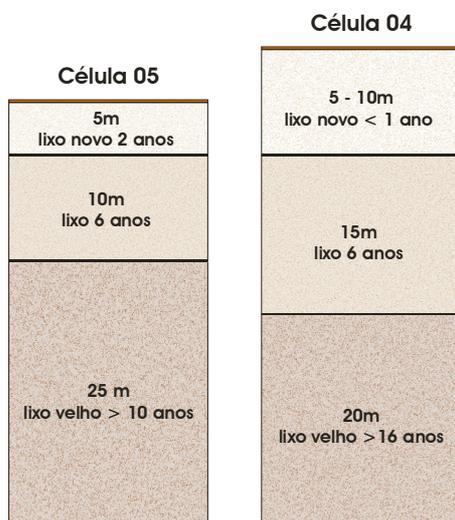


Figura 87 – Esquema da disposição das camadas de lixo nas células investigadas.

### 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.

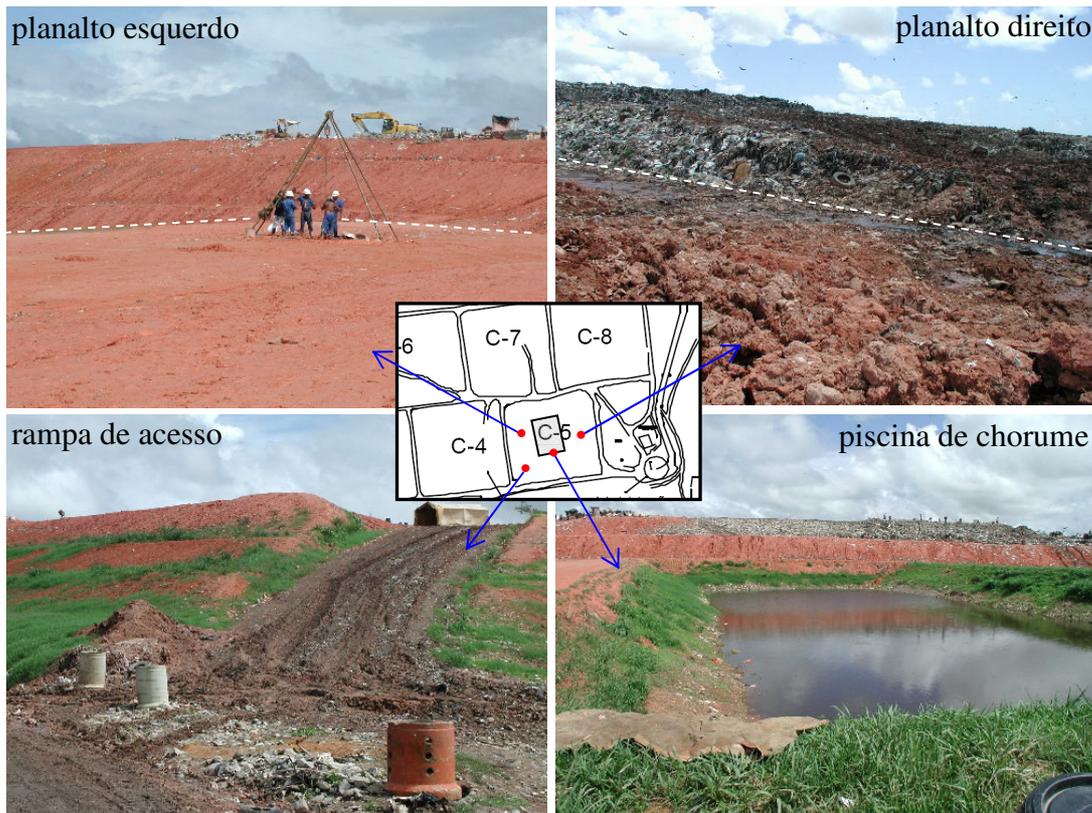


Figura 88 – Fotos da Célula 05 durante a campanha de ensaios.

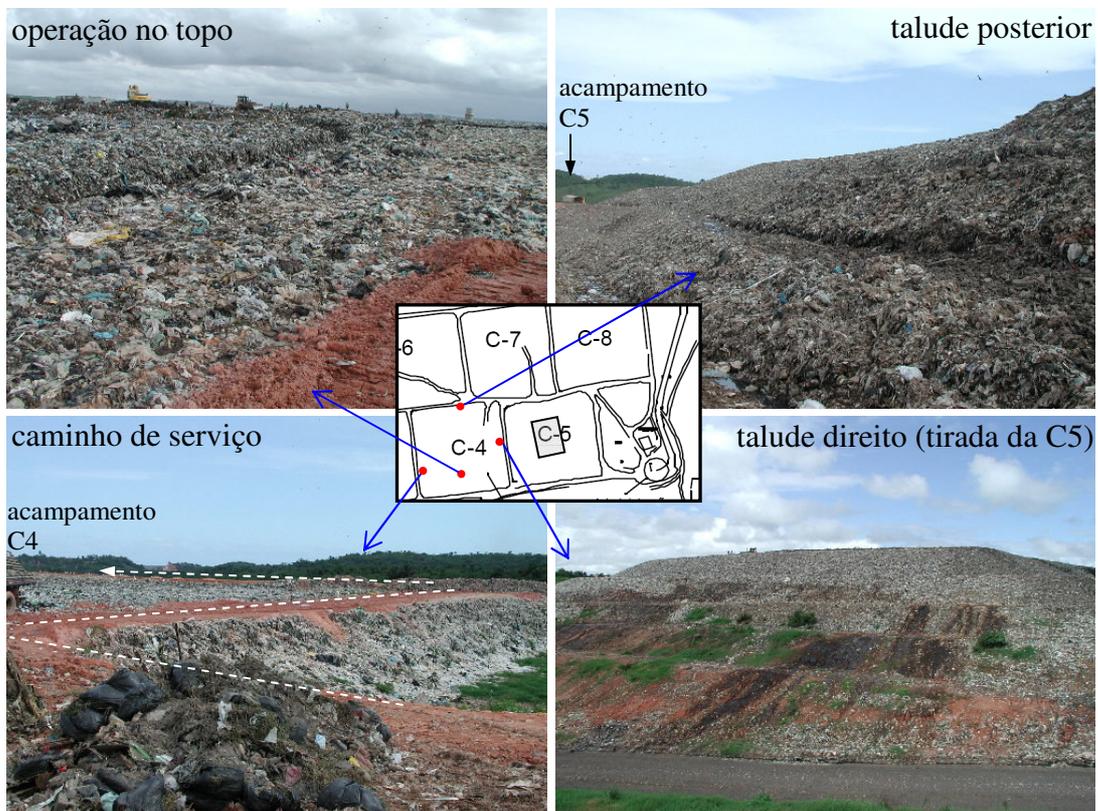


Figura 89 – Fotos da Célula 04 durante a campanha de ensaios.

### 5.3. Localção dos Pontos

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

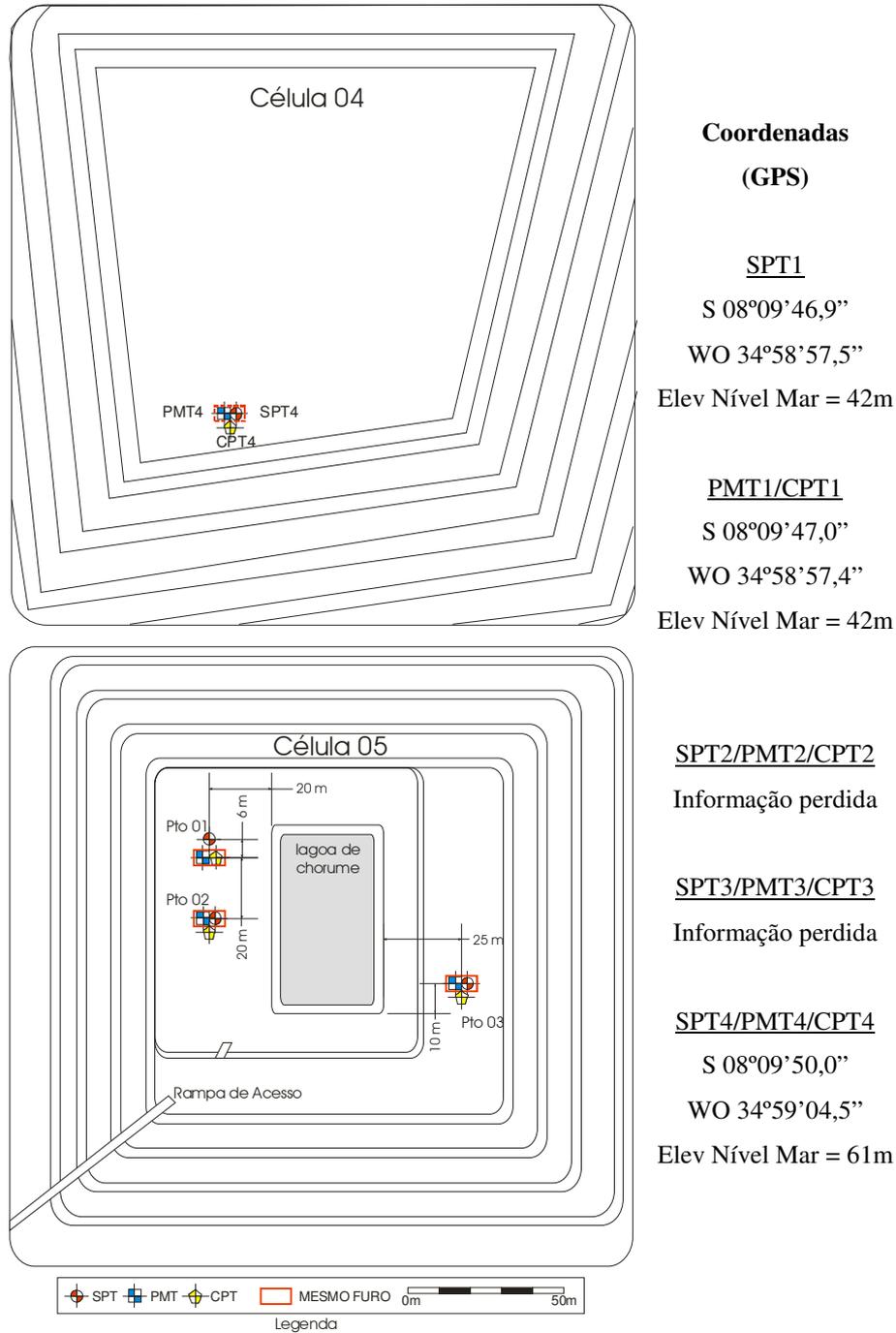


Figura 90 – Planta de locação dos pontos de investigação na Muribeca

#### **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 pressiómetro 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 pressiómetro 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 pressiómetro 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.

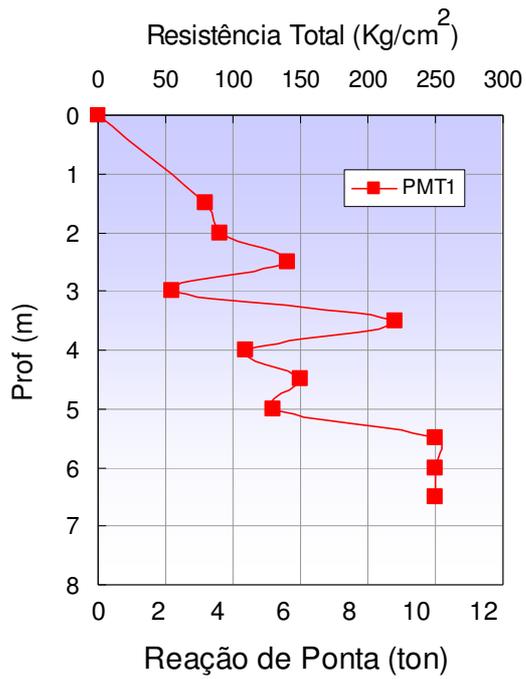


Figura 92 – Reação à cravação da sonda SP1 no furo PMT1.



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.

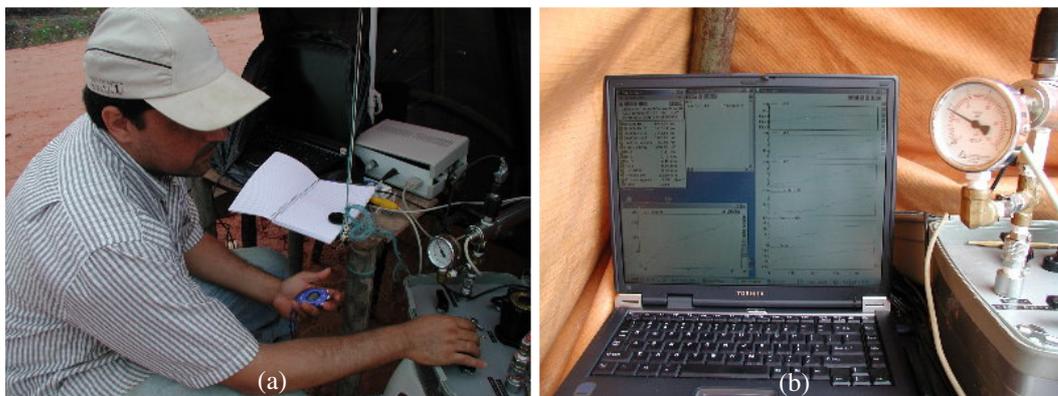


Figura 99 – Fotos da etapa de execução do ensaio: (a) aplicação dos acréscimos de pressão; (b) aquisição automática.

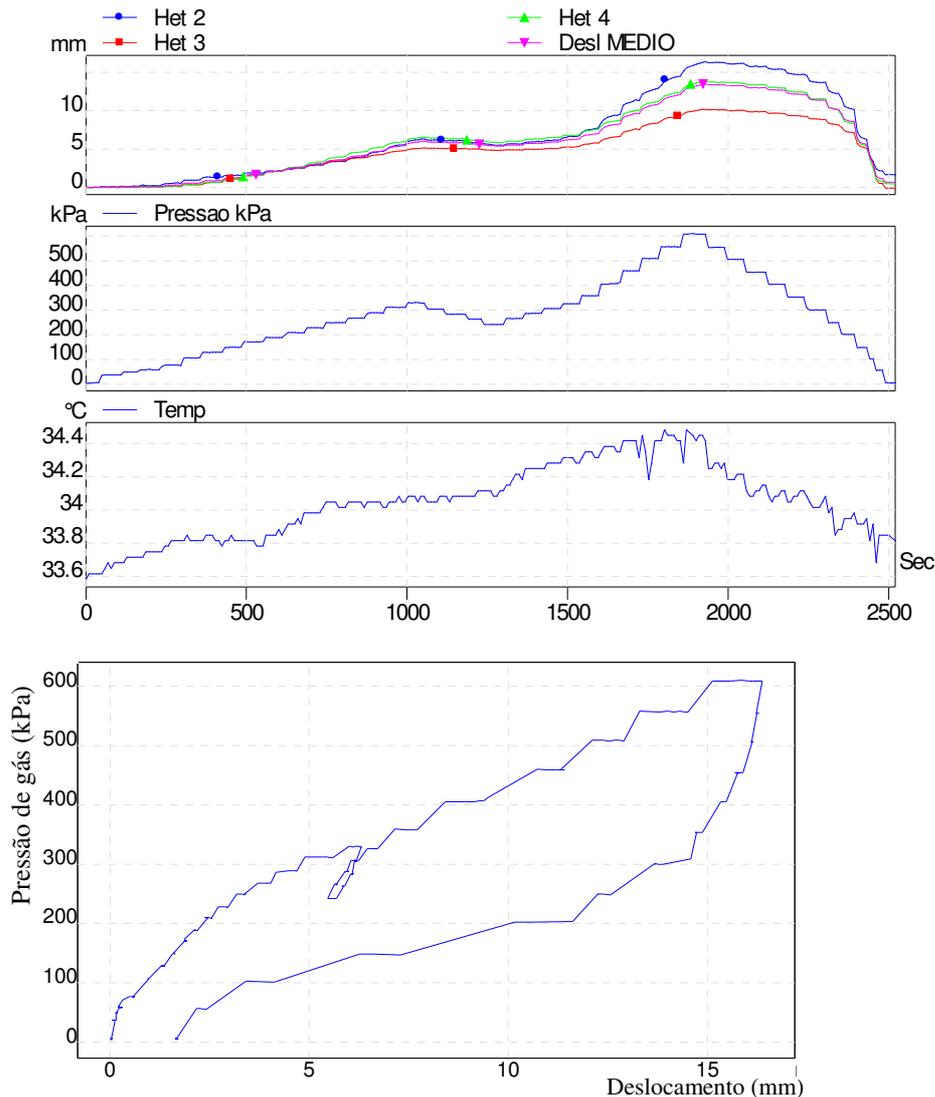


Figura 100 – Exemplo ilustrativo da saída gráfica durante um ensaio pressiométrico no aterro da Muribeca (PMT3 -6m)

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.

Ensaios 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.

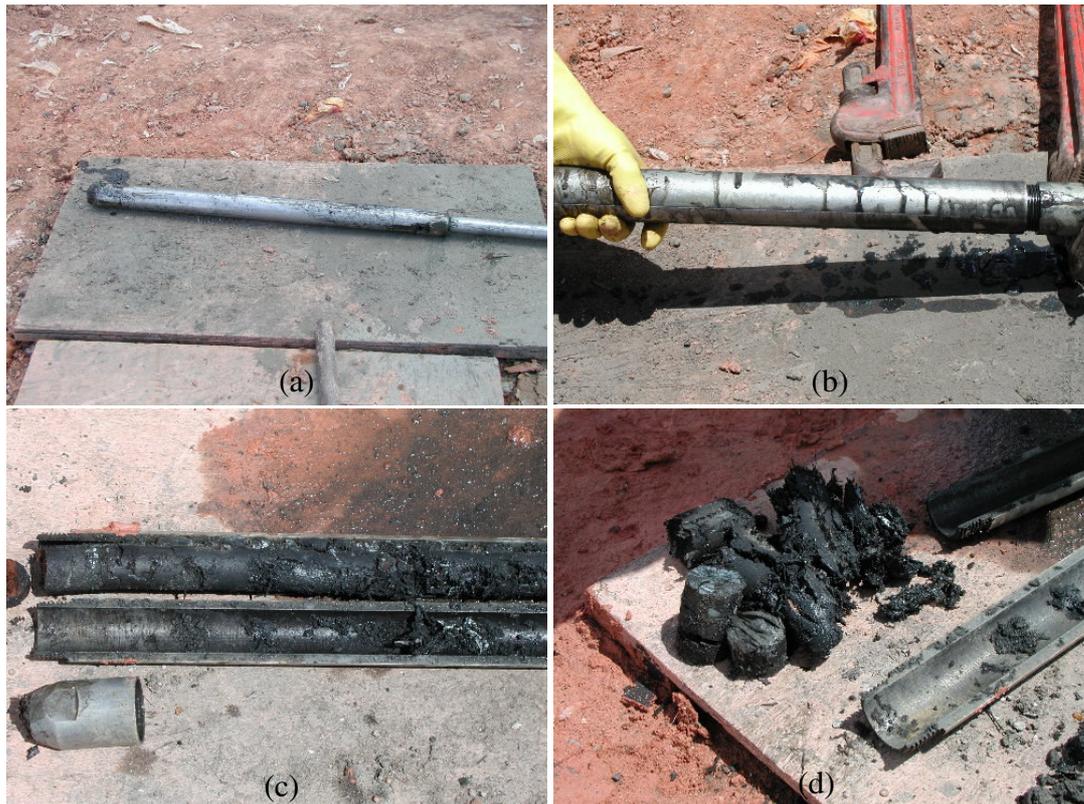


Figura 103 – Amostragem durante ensaios SPT em RSU: (a) amostrador padrão; (b) abertura do amostrador; (c) material bem recuperado; (d) parcela da amostra representativa.

### 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.

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

#### 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.

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

### 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.

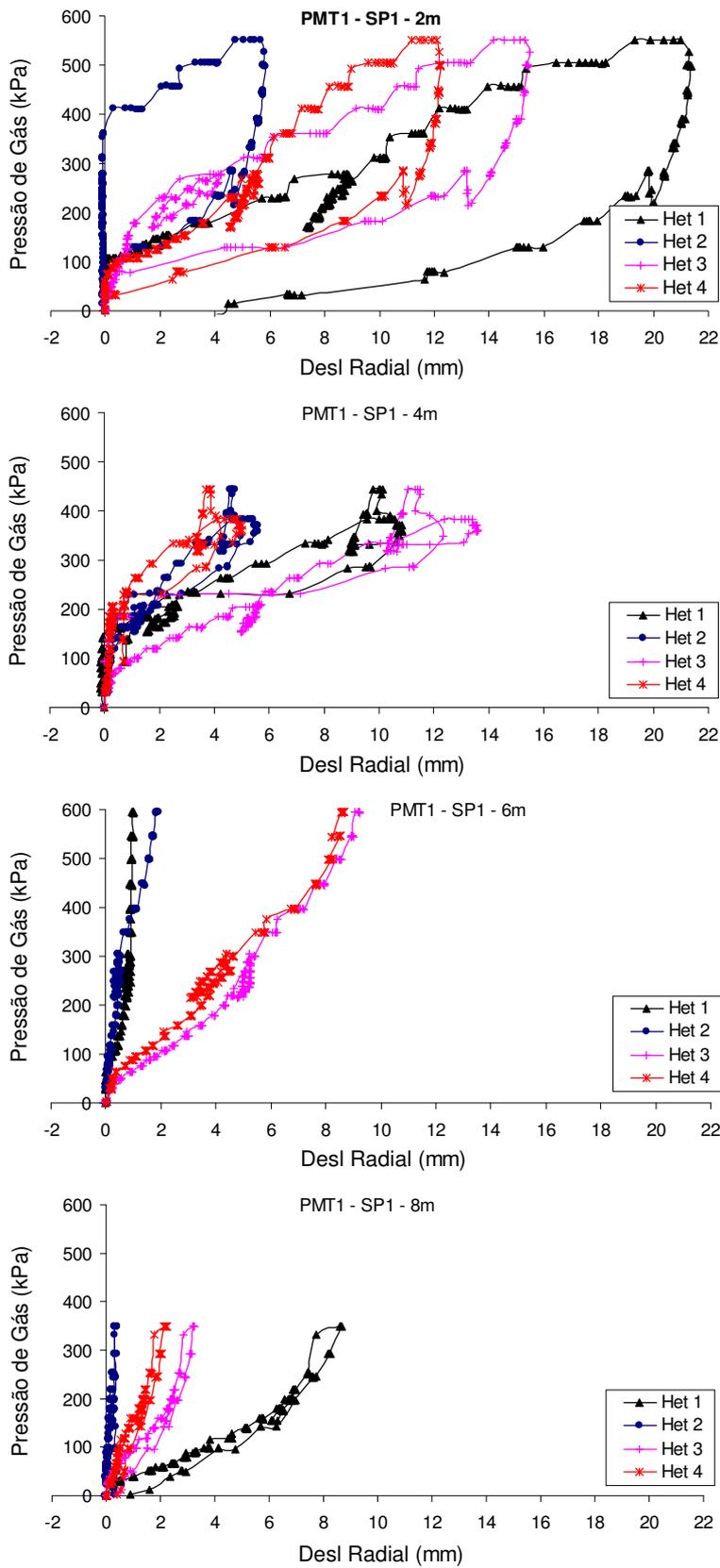


Figura 105 – Curvas pressão x deslocamento PMT1– **dados brutos**, sem correção da rigidez da membrana.

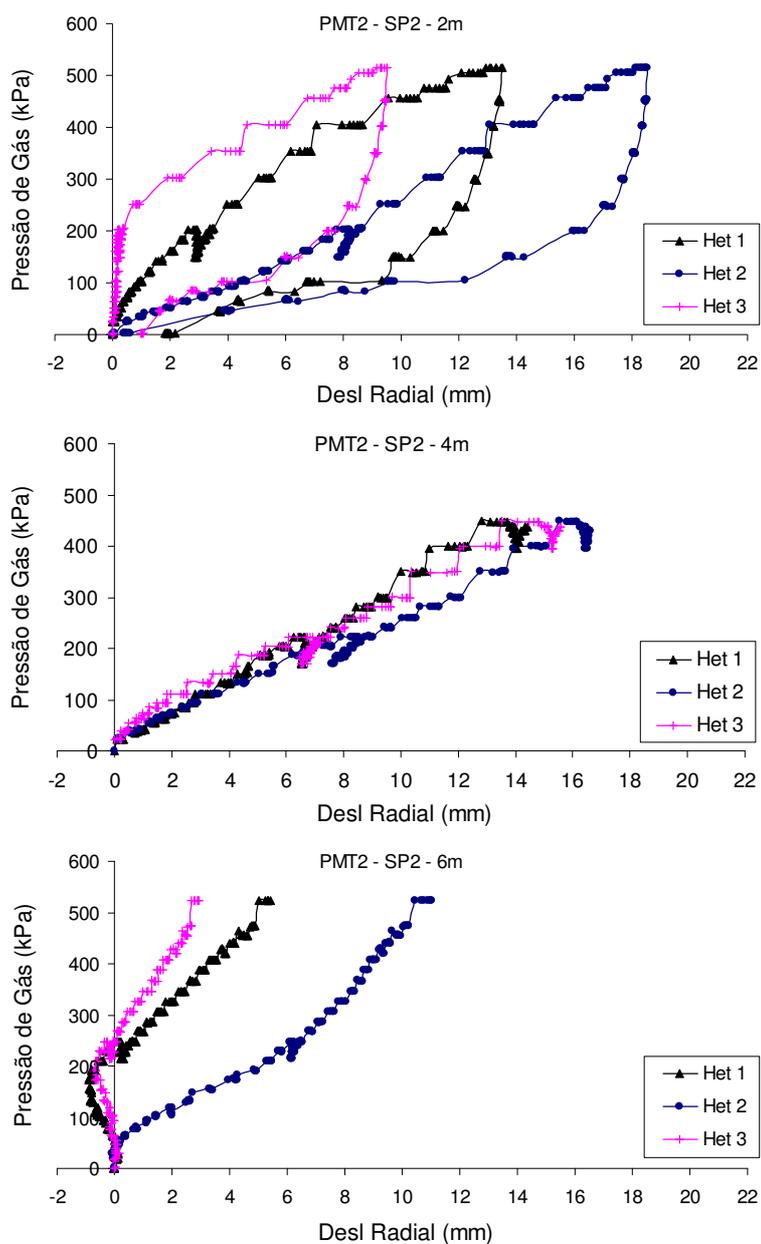


Figura 106 – Curvas pressão x deslocamento PMT2– **dados brutos**, sem correção da rigidez da membrana.

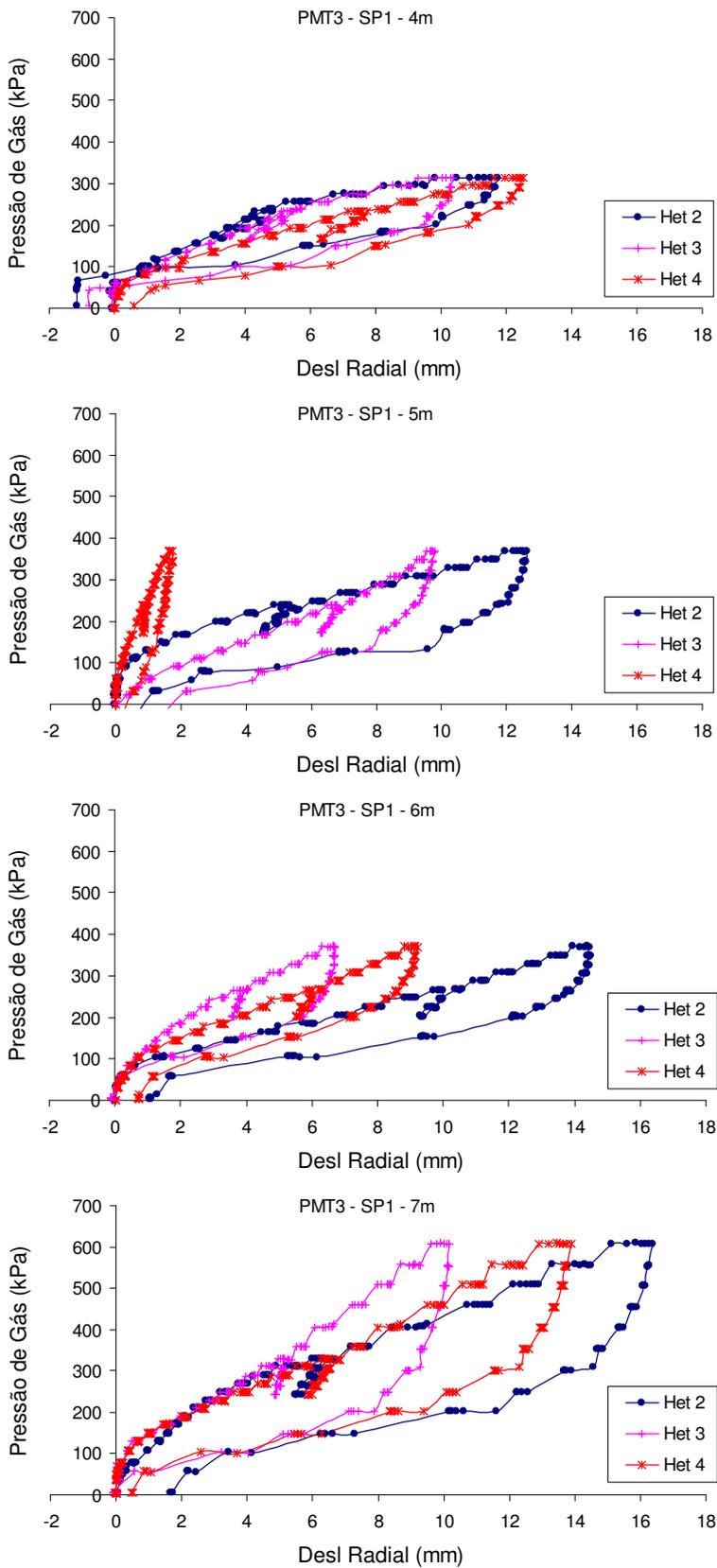


Figura 107 – Curvas pressão x deslocamento PMT3– **dados brutos**, sem correção da rigidez da membrana

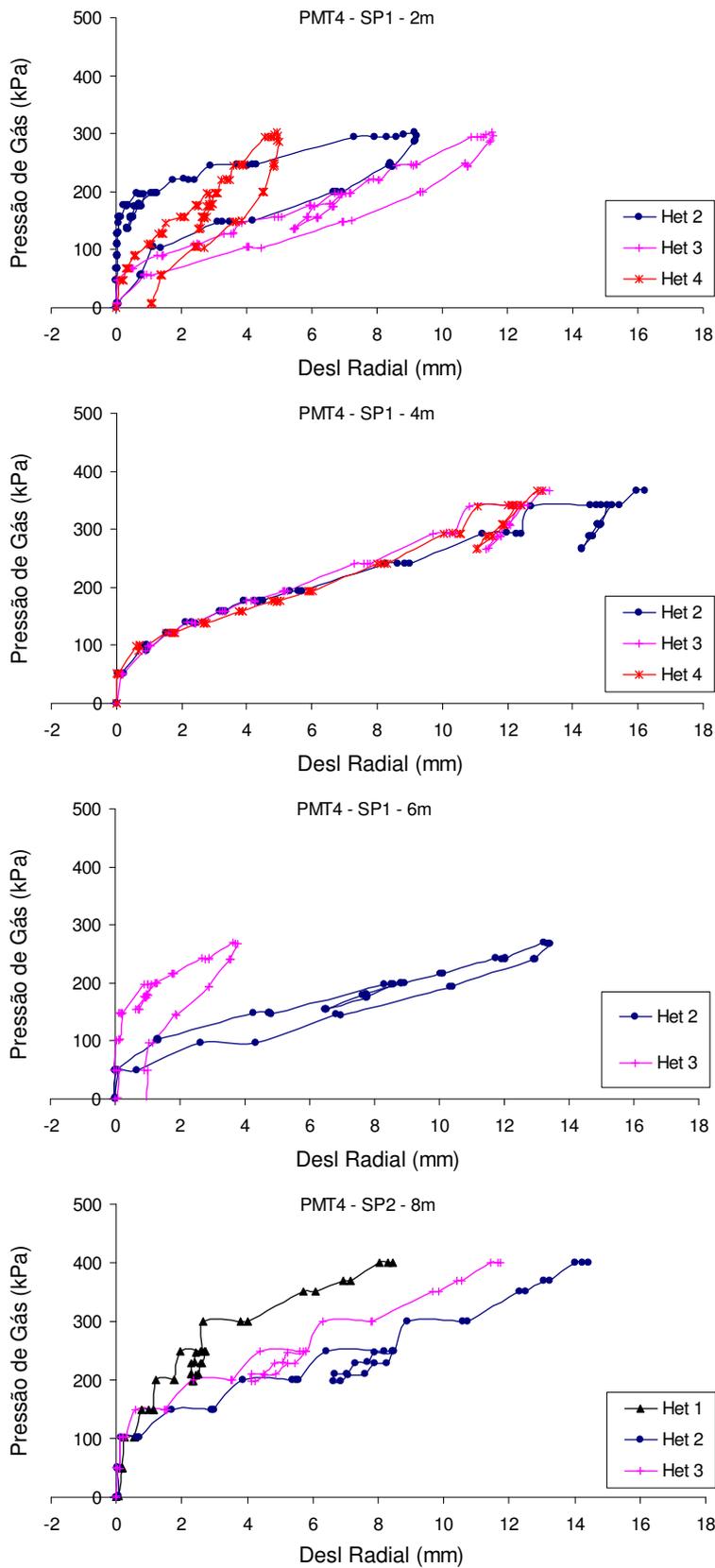


Figura 108 – Curvas pressão x deslocamento PMT4– **dados brutos**, sem correção da rigidez da membrana

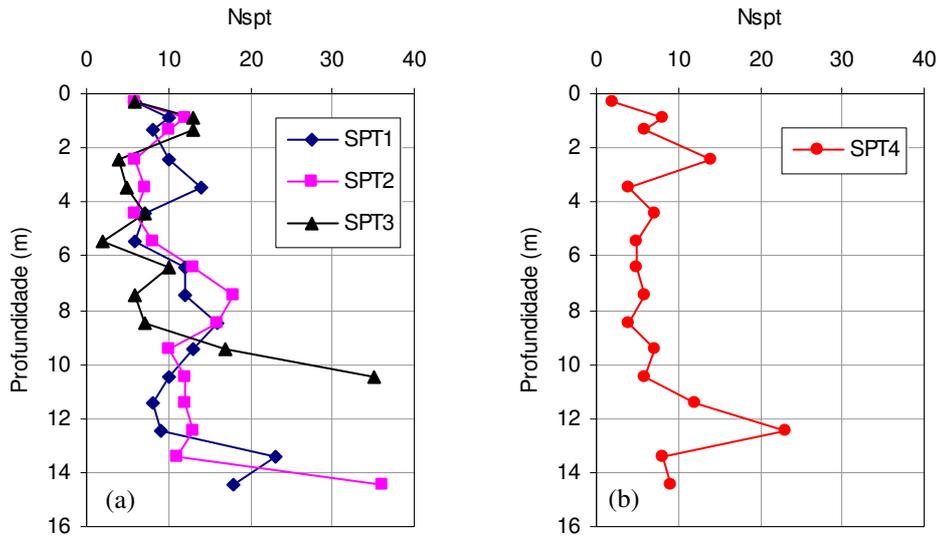


Figura 109 – Resultados de ensaios SPT: (a) Célula 05; (b) Célula 04

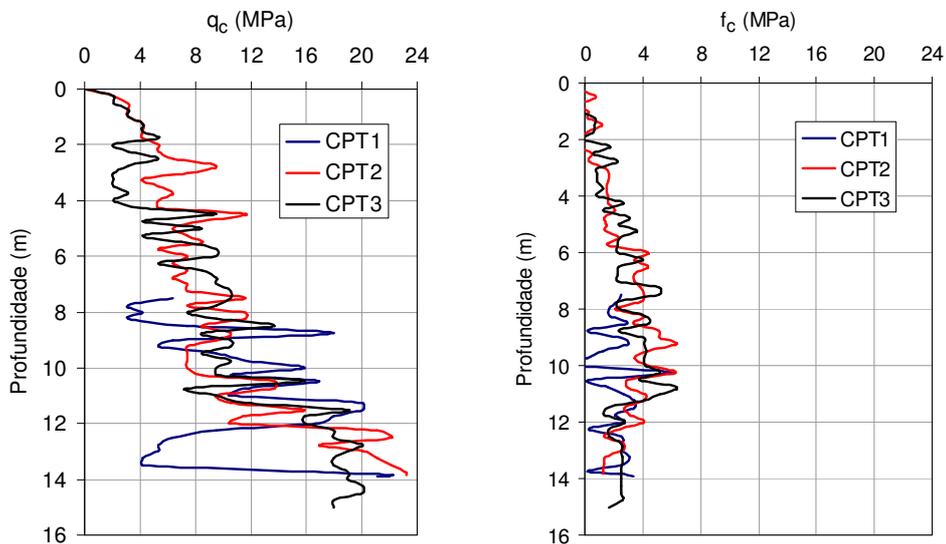


Figura 110 – Variação de  $q_c$  e  $f_s$  na célula C5.

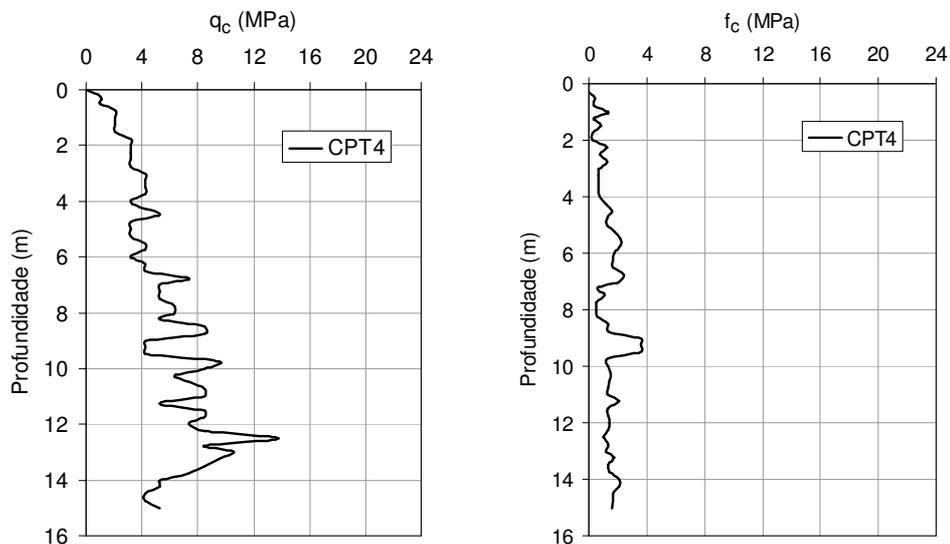


Figura 111 – Variação de  $q_c$  e  $f_s$  na Célula 04.

**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.

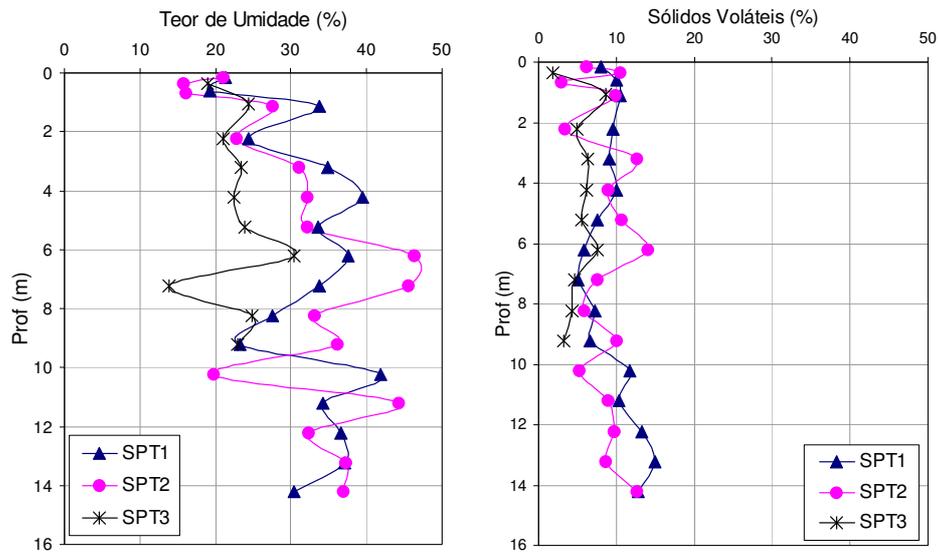


Figura 112 – Variação de teor de umidade e sólidos voláteis na célula C5.

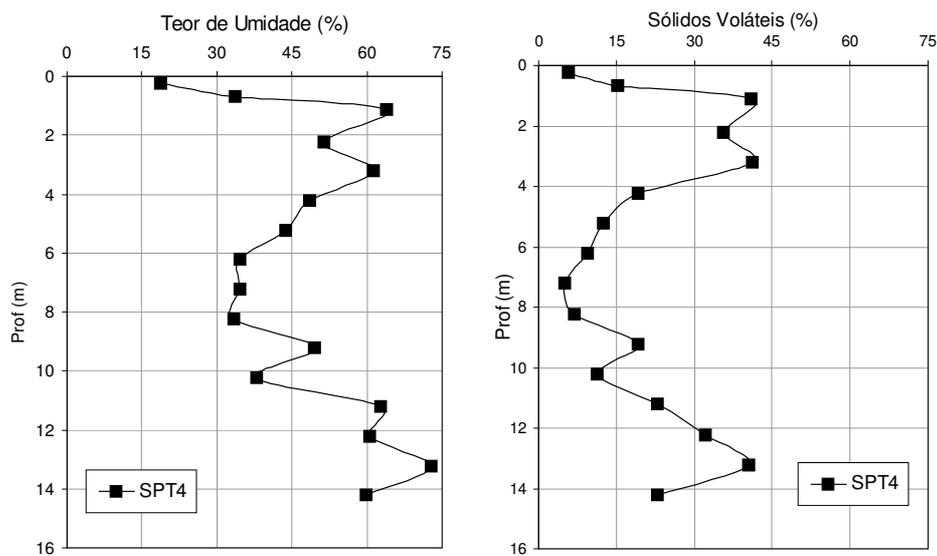


Figura 113 – Variação de teor de umidade e sólidos voláteis na célula C4.