

## **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 ( $L/D \approx 10$ ).

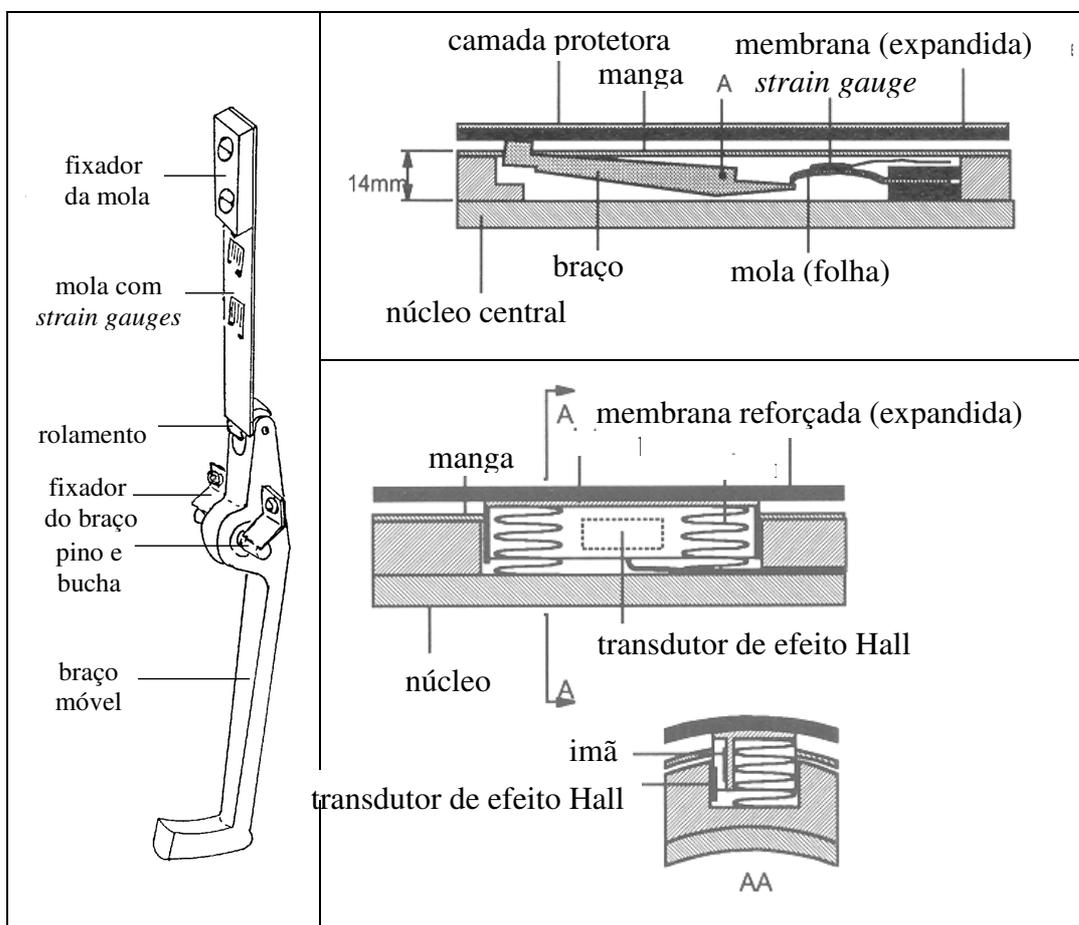


Figura 32 - Sistemas de medições de deslocamentos em pressiômetros.

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.

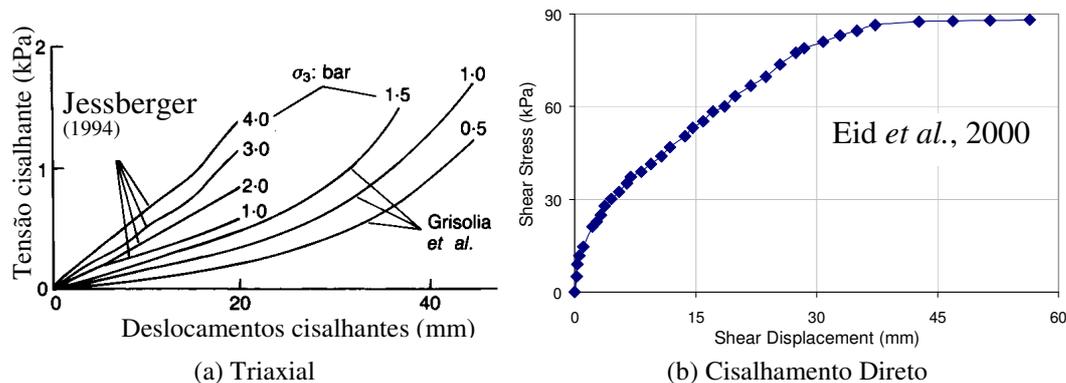


Figura 33 - Relações tensão-deslocamento em ensaios com RSU.

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.

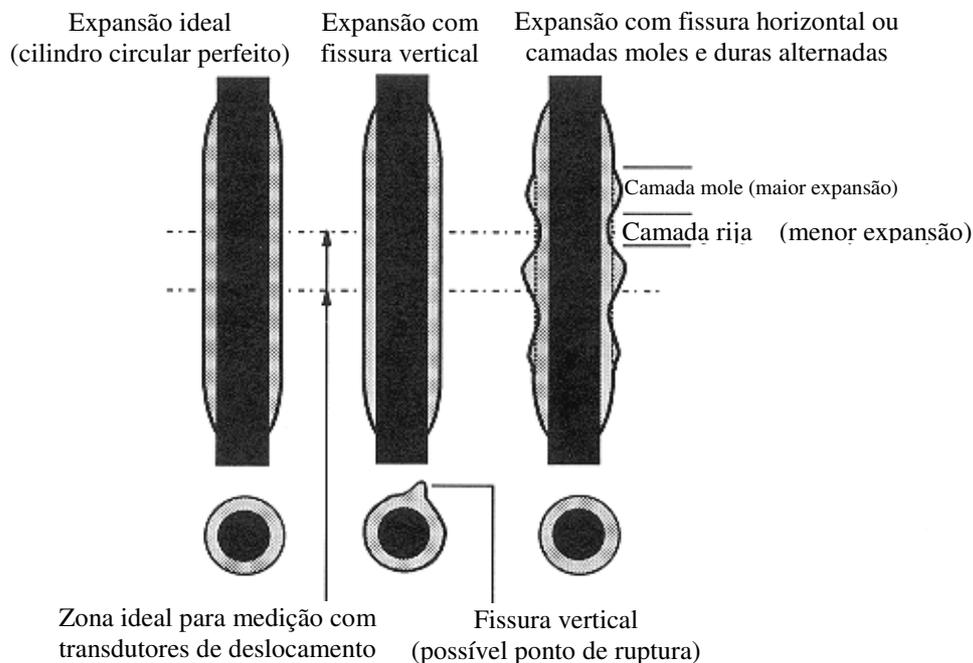


Figura 34 - Fatores intervenientes na ruptura da membrana pressiométrica.

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.

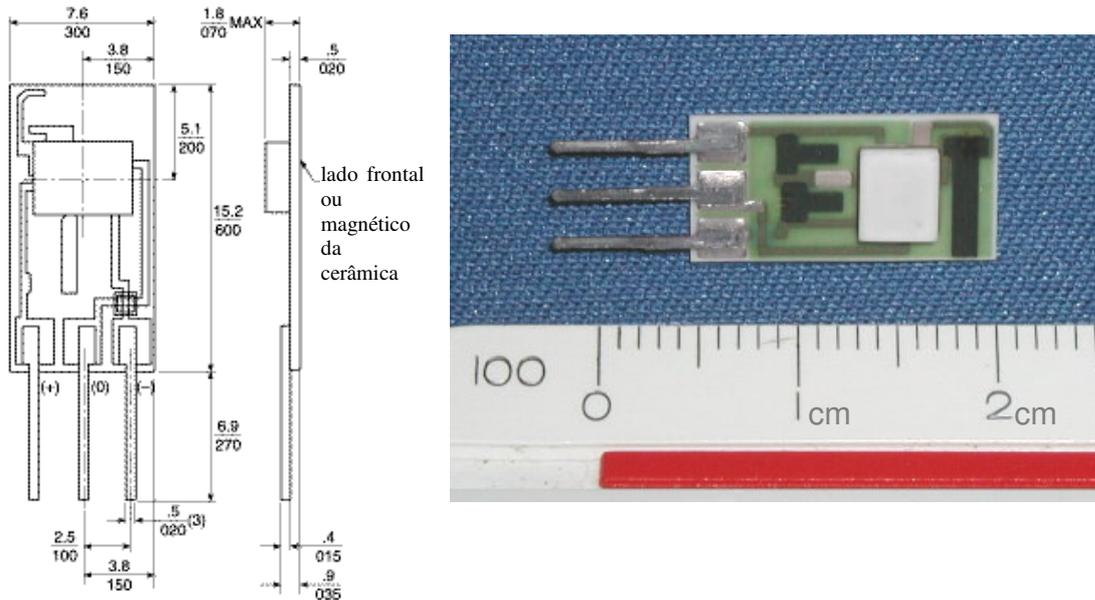


Figura 35 - Detalhe e foto do transdutor de efeito Hall utilizado.

#### 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 movimenta um segundo braço que traz consigo um módulo com um ímã acoplado de com orientação paralela ao HET.

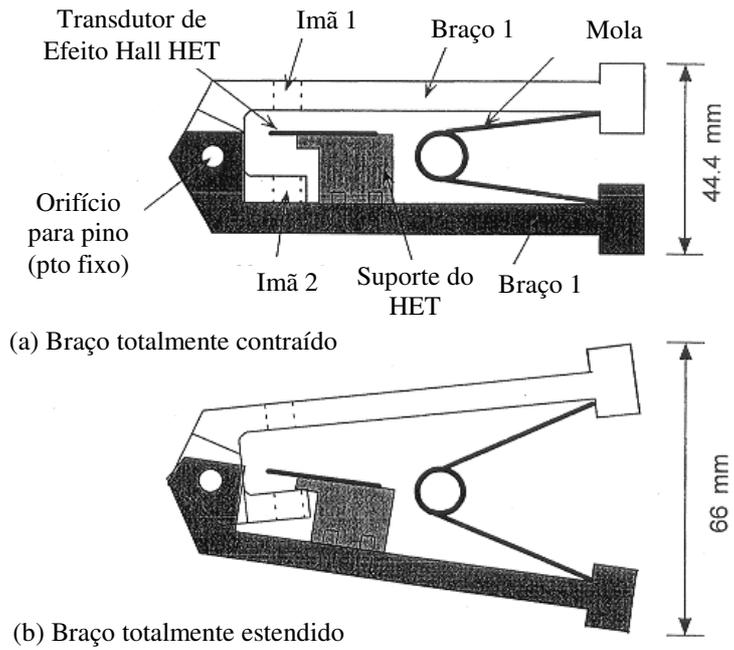


Figura 36 - Detalhe do sistema de medição existente concebido por Akbar (2001).

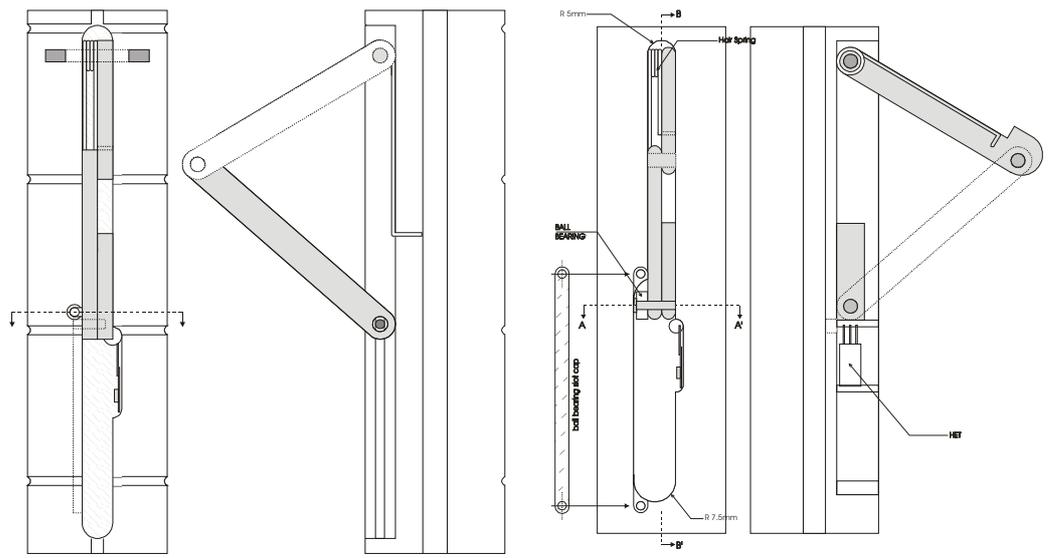


Figura 37 - Projetos piloto com movimento de ímã paralelo ao HET.

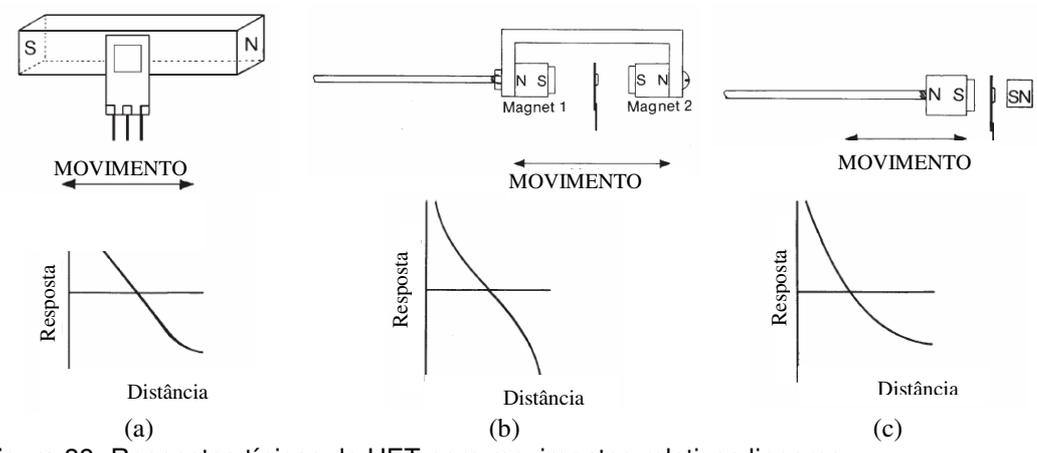


Figura 38- Respostas típicas do HET para movimentos relativos lineares.

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.

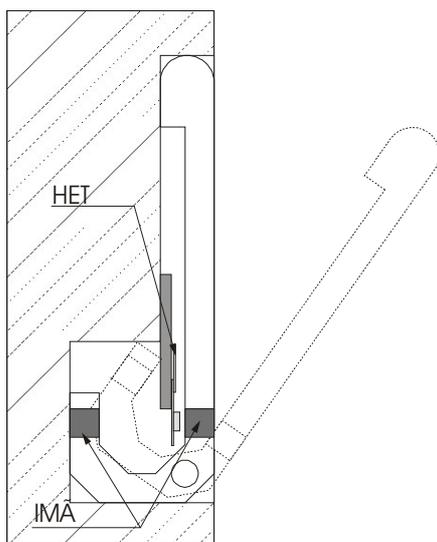


Figura 39- Esquema inicial do movimento dos imãs em relação ao HET.

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 n° 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.

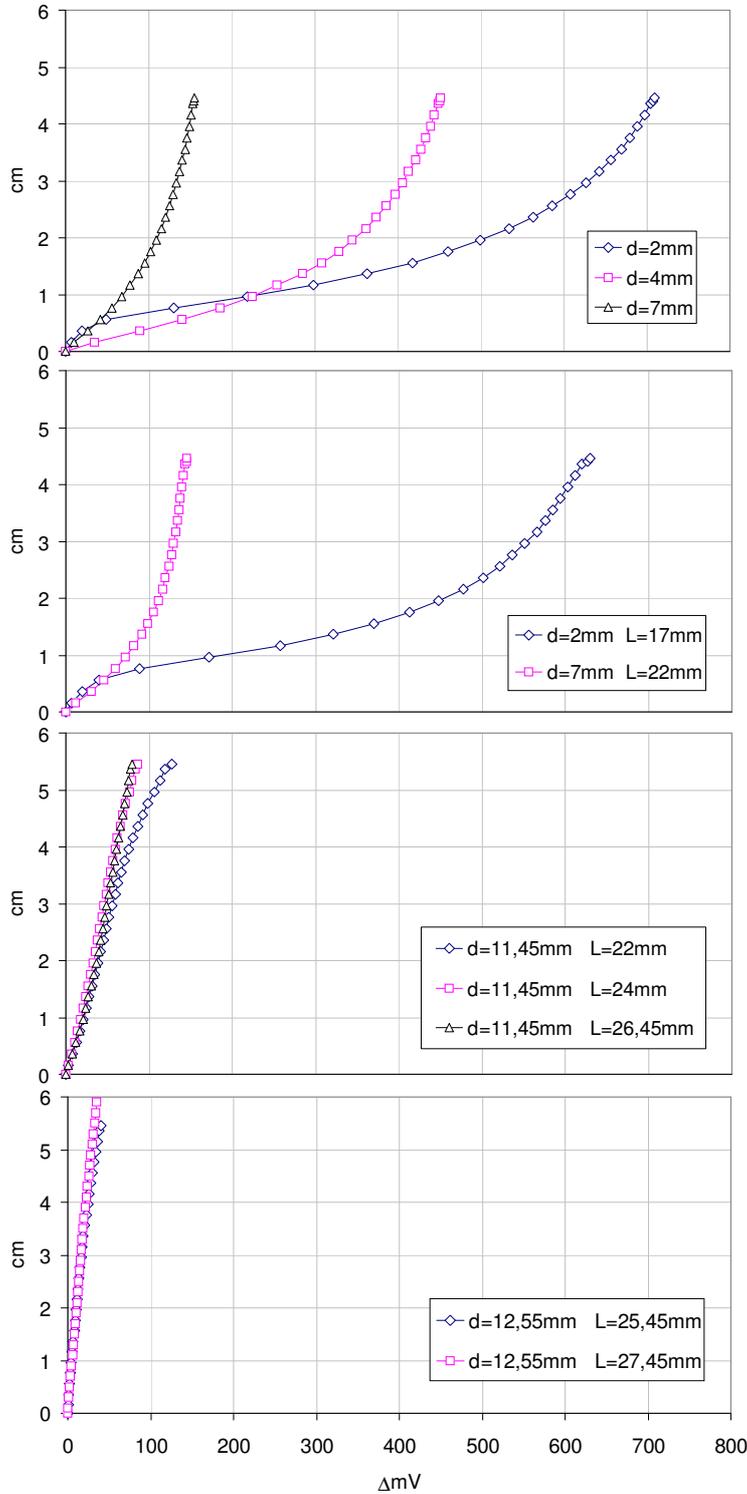
O procedimento seguido nas investigações foi realizar calibrações de abertura e fechamento dos braços para diferentes posições do HET em relação ao ímã, isto é, calibrar para várias combinações de distância e alinhamento entre os dois até obter os resultados mais lineares possíveis. Uma fonte ajustada 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.

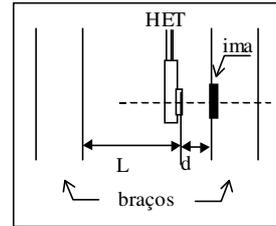
Na análise 3, o aumento do espaçamento do ímã à direita minorou o efeito da não linearidade no trecho inicial da curva. Igualmente, a mudança de alinhamento e o aumento em espaçamento do ímã à esquerda, influenciaram positivamente na diminuição do grau do polinômio de ajuste da reta.

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.

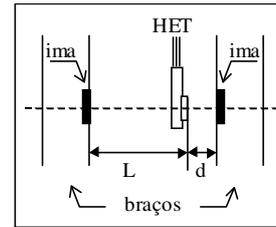
As curvas de ajuste para a Análise 4 e o melhor resultado da Análise 3 estão re-apresentadas na Figura 42 para efeito de comparação. O melhor ajuste para a calibração foi um polinômio de segundo grau, similar ao obtido por Akbar (2001) em seu sistema de medição da Figura 36.



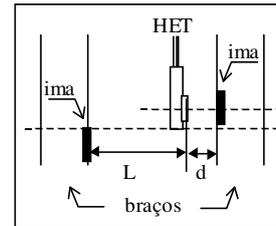
Análise 1



Análise 2



Análise 3



Análise 4

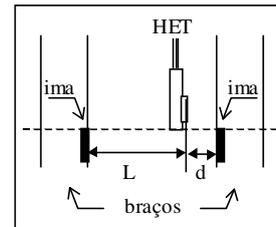


Figura 41 - Influência da distância/alinhamento dos imãs nas calibrações do protótipo.

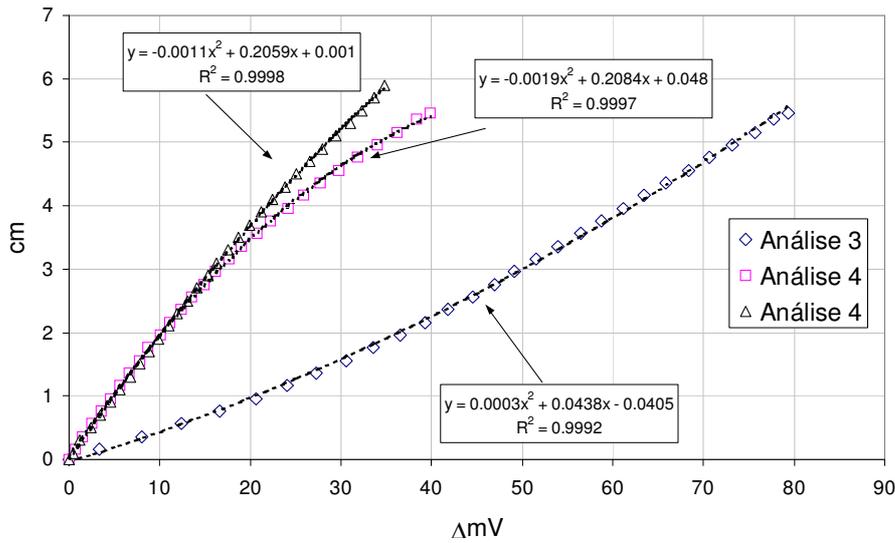


Figura 42 - Melhores curvas de calibração do segundo protótipo.

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.

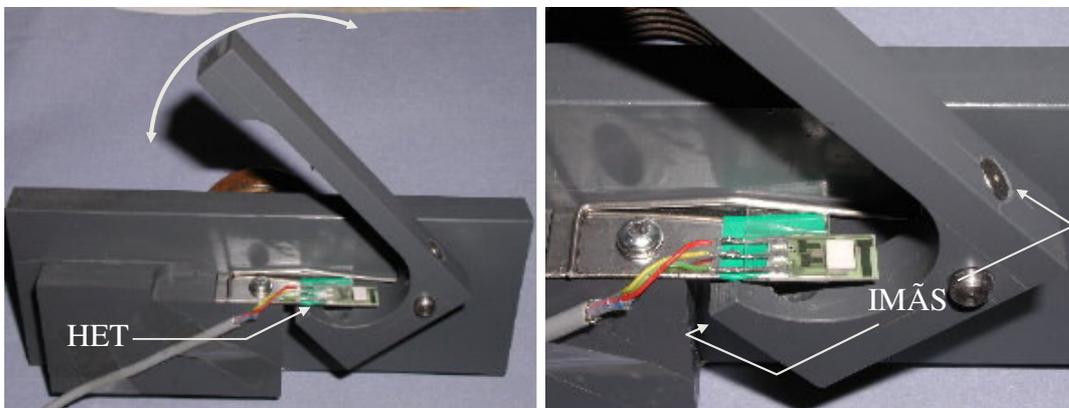


Figura 43 - Fotos do protótipo final do SMD com o HET e ímãs mostrados.

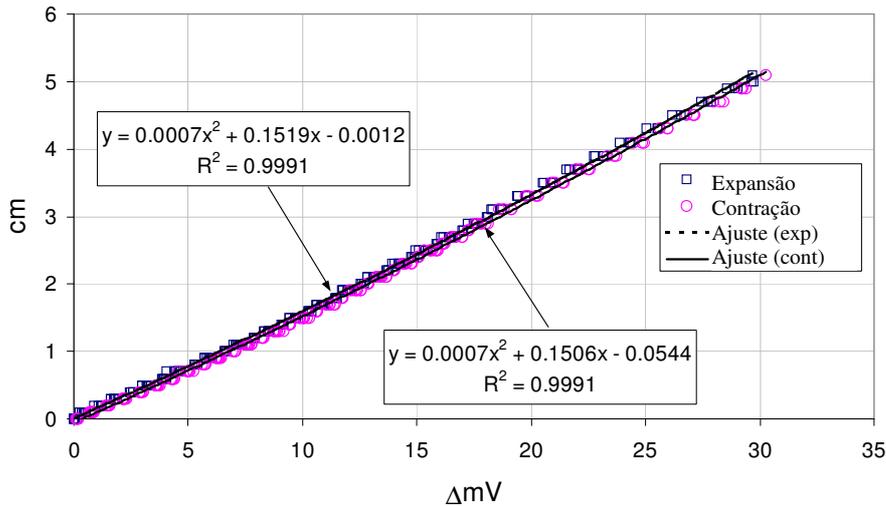


Figura 44 - Resultados de calibrações com o protótipo final em ciclos de expansão/contração.

### 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.

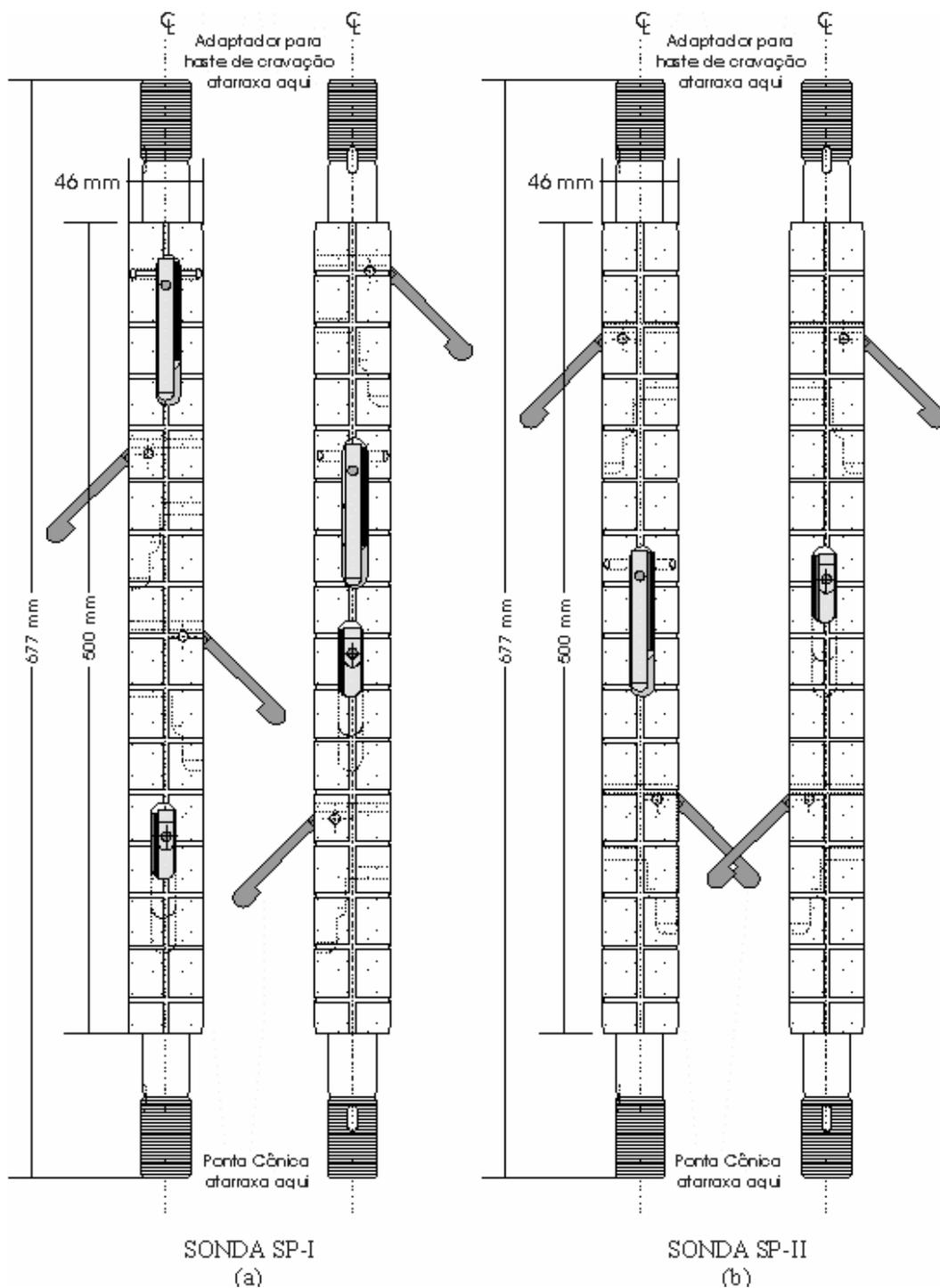


Figura 45 - Desenhos esquemáticos do corpo central das sondas SP-I e SP-II.

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.

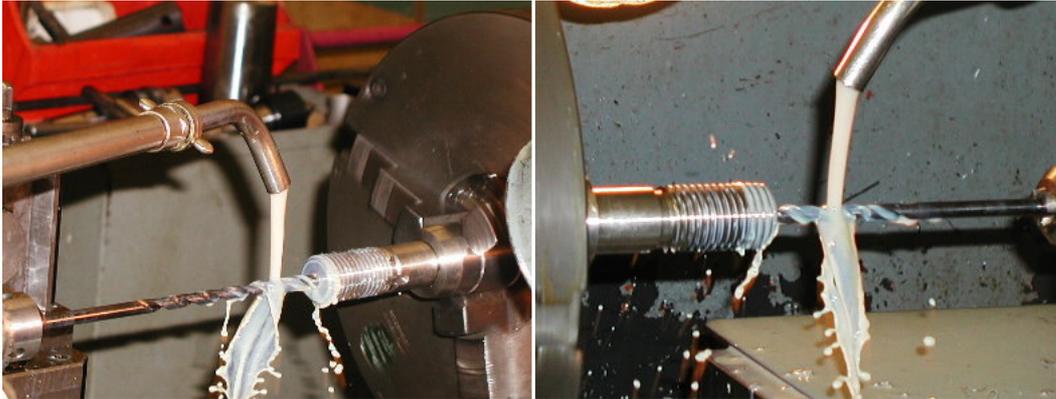


Figura 46 - Perfuração de furo longitudinal para dar acesso à fiação e gás pressurizado.

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.

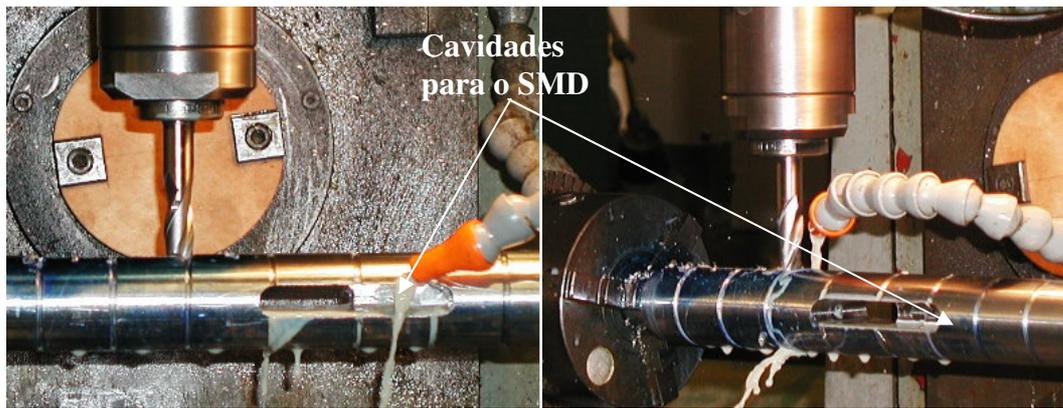


Figura 48 - Torneamento das cavidades para o SMD.

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.

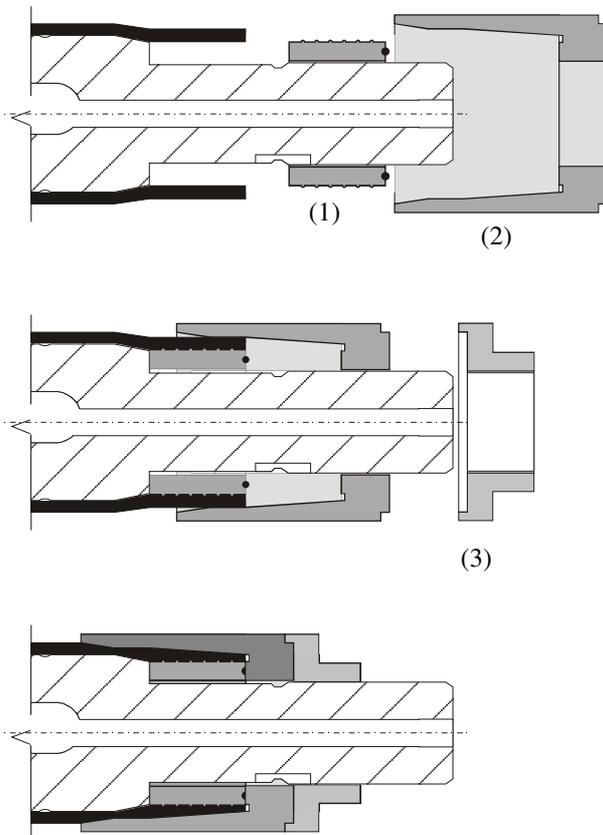


Figura 50 - Detalhe do sistema de fixação da membrana expansível

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.

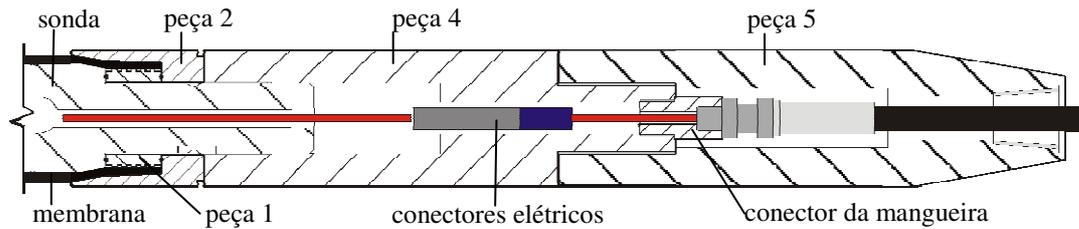


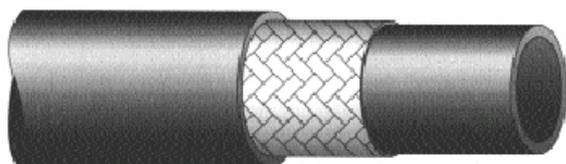
Figura 51 – Esquema da fixação da membrana no topo das sondas

#### 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.

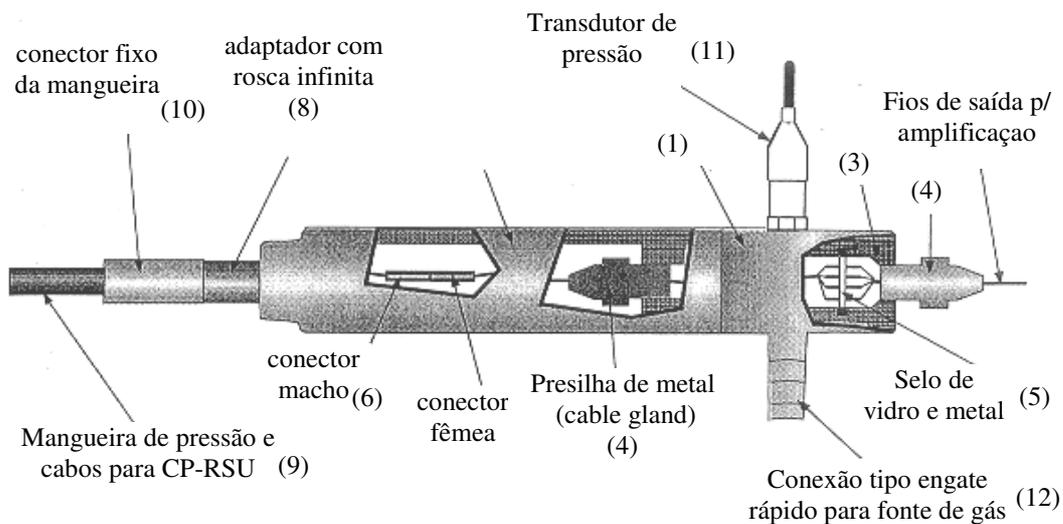


Figura 54 - Detalhe do separador elétrico-gasoso.

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.

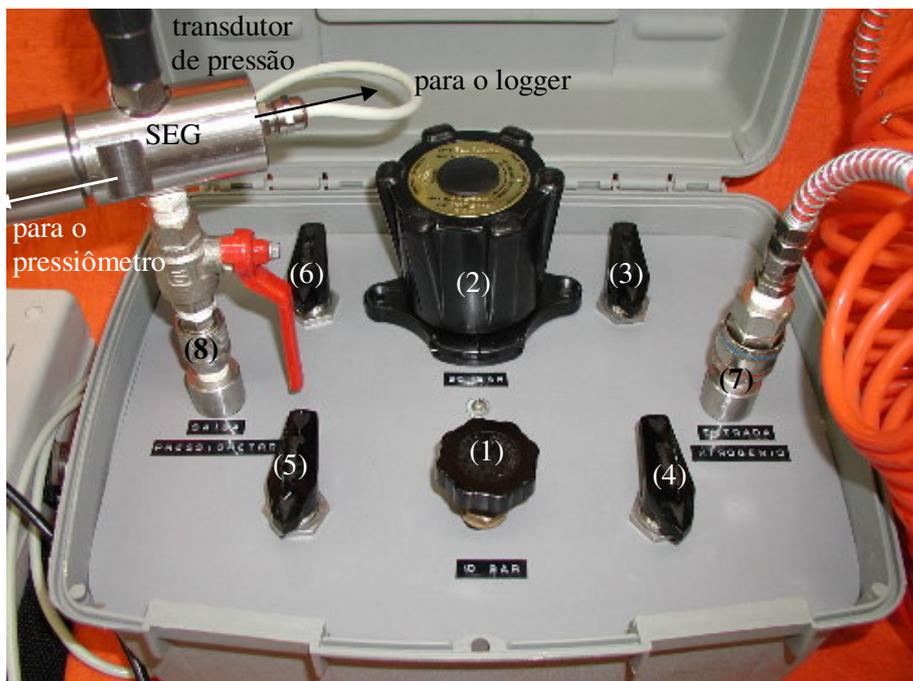


Figura 55 - Detalhe frontal do painel da caixa de controle.

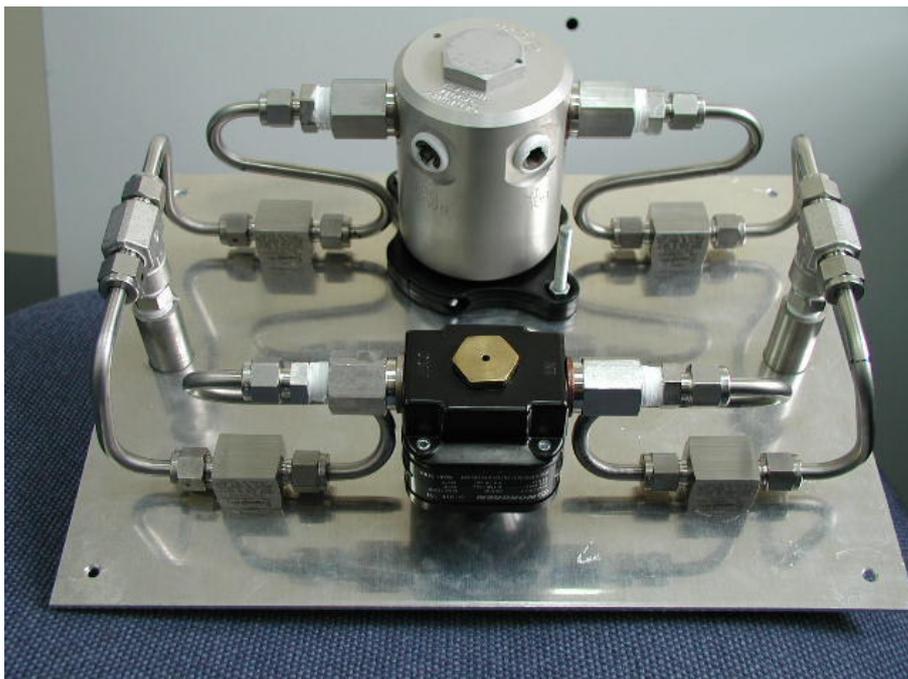


Figura 56 - Detalhe das conexões e tubulações internas da caixa de controle.

#### 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.

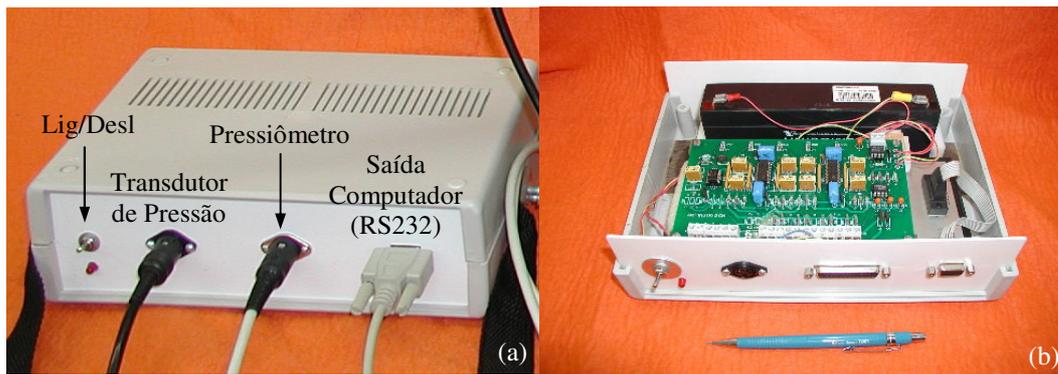


Figura 57 – Fotos da caixa eletrônica de amplificação e aquisição.

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.

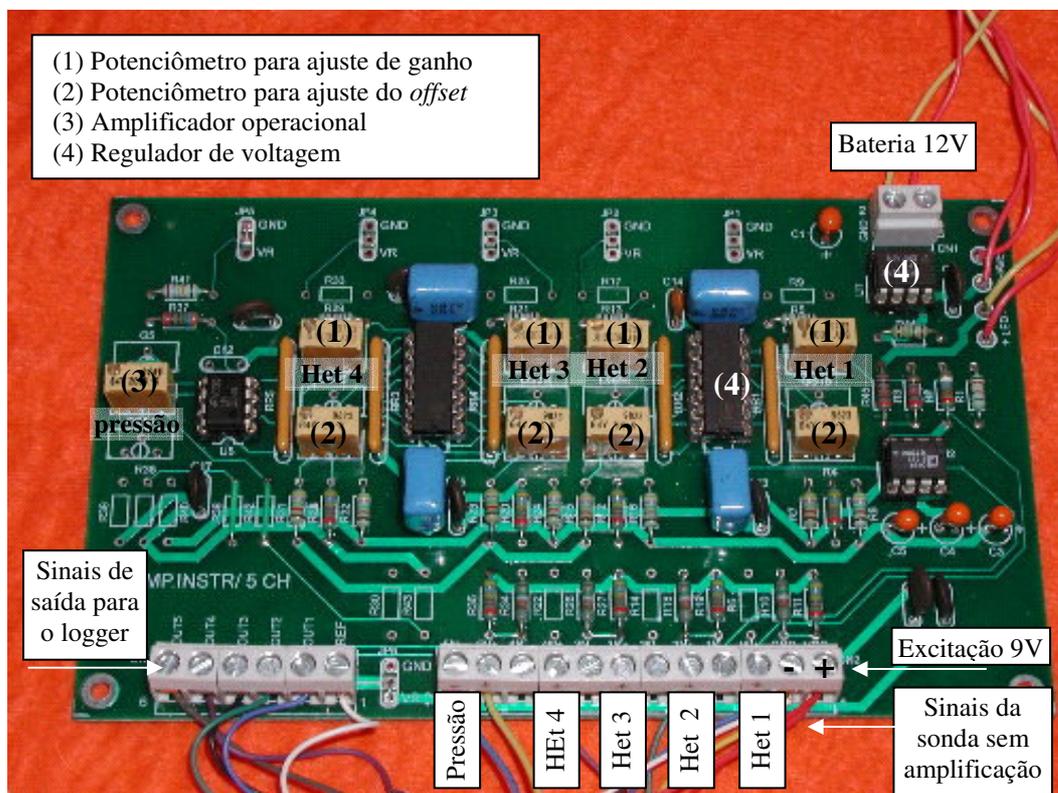


Figura 59 – Detalhes do CI de amplificação da caixa eletrônica.

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 disso, 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.

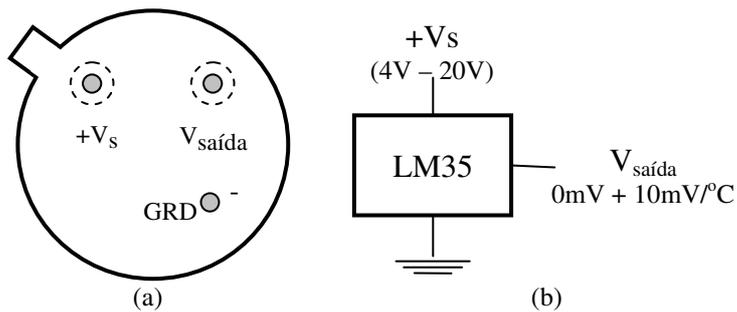


Figura 62 – Detalhes sobre a aplicação do sensor de temperatura LM35.

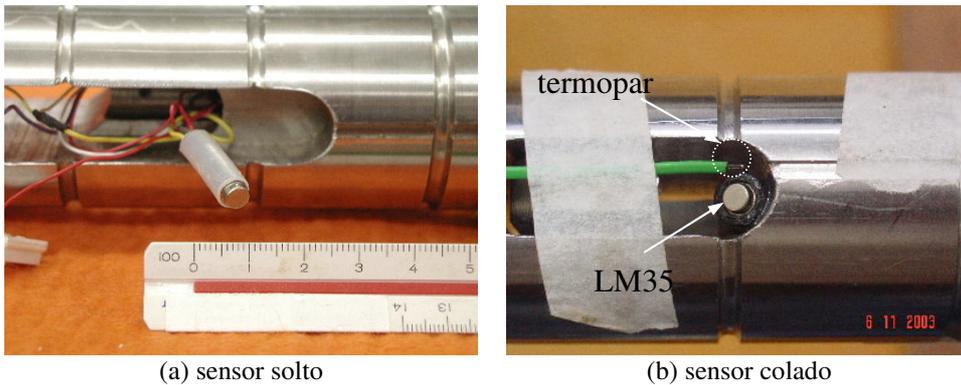


Figura 63 – Fotos do sensor de temperatura e sua localização na sonda.

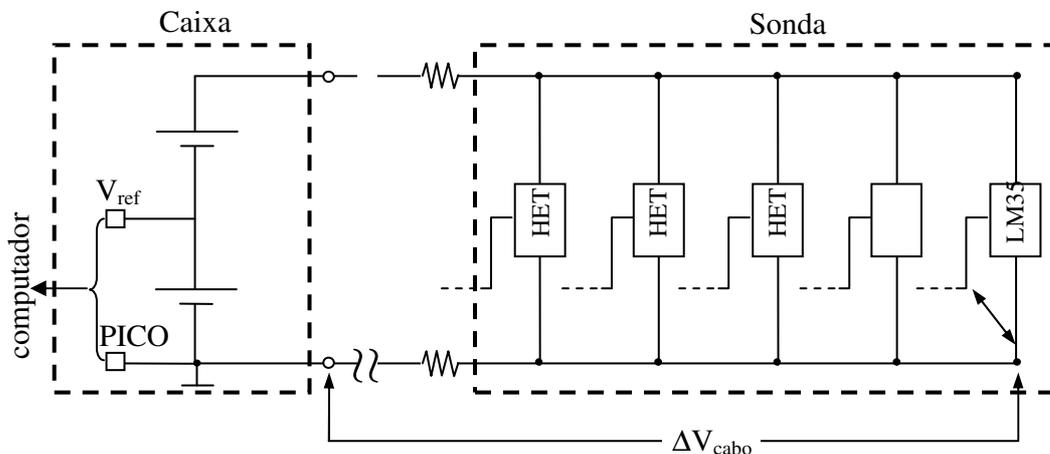


Figura 64 – Esquema da conexão elétrica do sensor de temperatura.

#### 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.

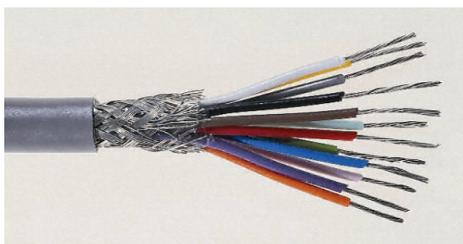


Figura 65 - Exemplo ilustrativo dos cabos elétricos utilizados.

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.

| <b>Pino/Canal</b> | <b>Conexão</b>              |
|-------------------|-----------------------------|
| 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           | <i>Ground</i> 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.

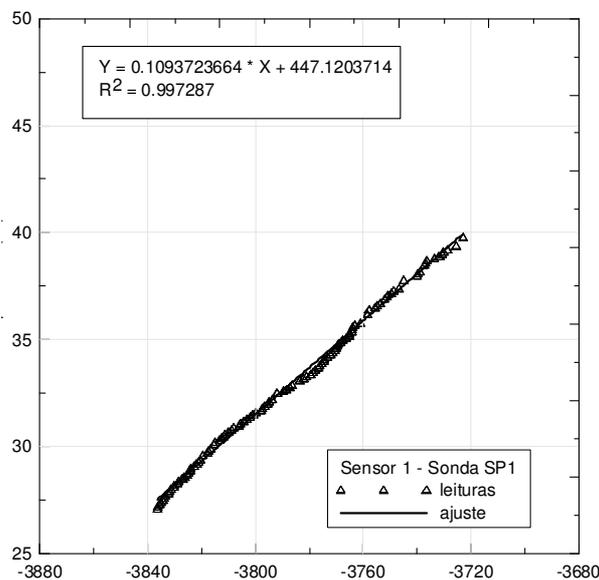


Figura 67 – Resultados da calibração do sensor de temperatura da sonda SP1.

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.

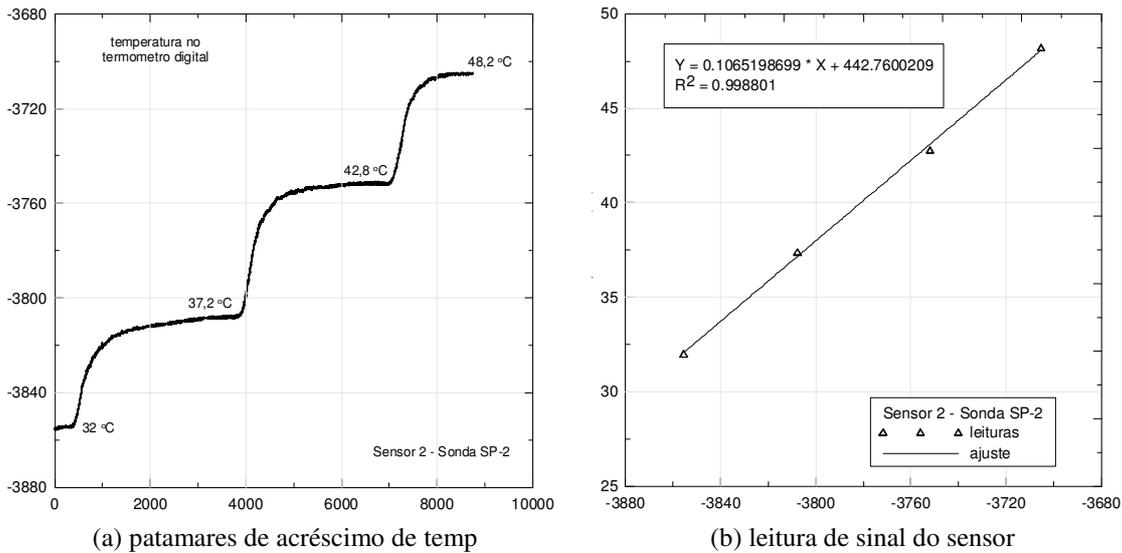


Figura 68 – Resultados da calibração do sensor de temperatura da sonda SP2.

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)<br>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.

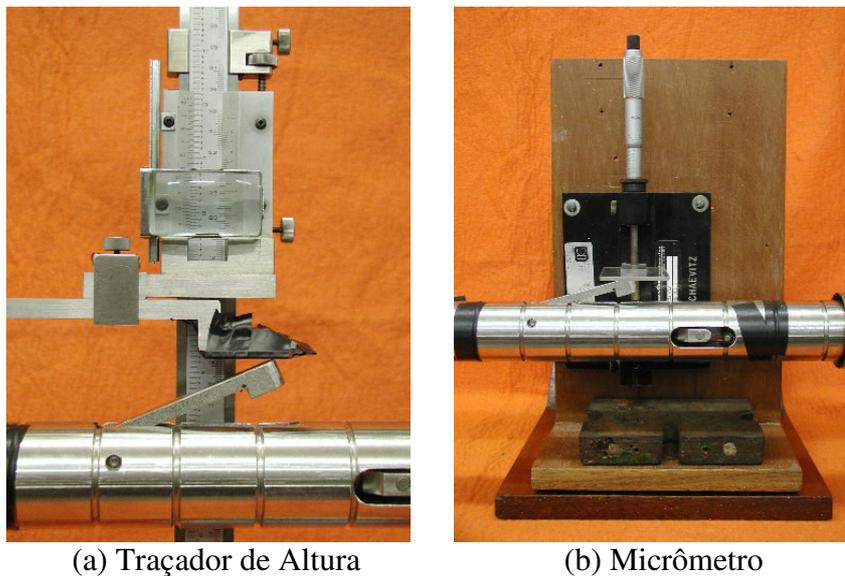


Figura 69 – Dispositivos empregados na calibração dos transdutores de deslocamento.

#### 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.

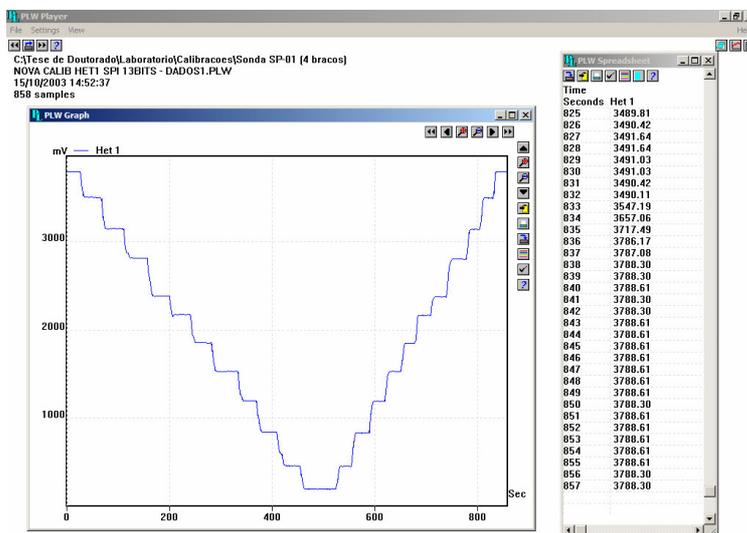


Figura 70 – Exemplo da saída gráfica do programa *Picolog* durante calibrações do transdutor de deslocamento.

#### 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.

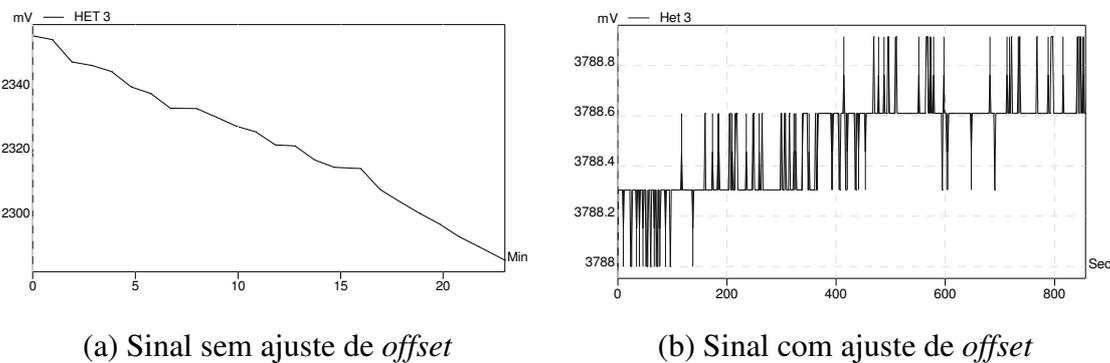


Figura 71 – Comparação entre sinais com e sem ajuste de *offset* para a condição de braço recolhido.

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.

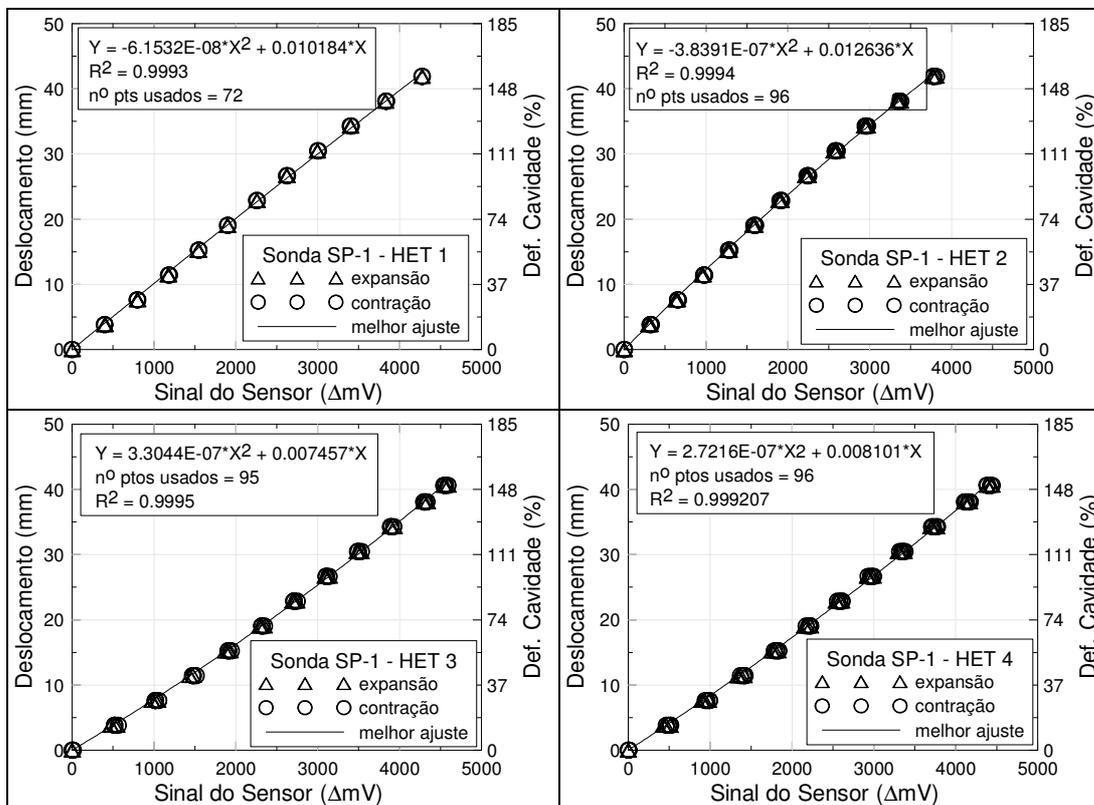


Figura 72 – Resultados da calibração dos transdutores de deslocamentos da sonda SP1.

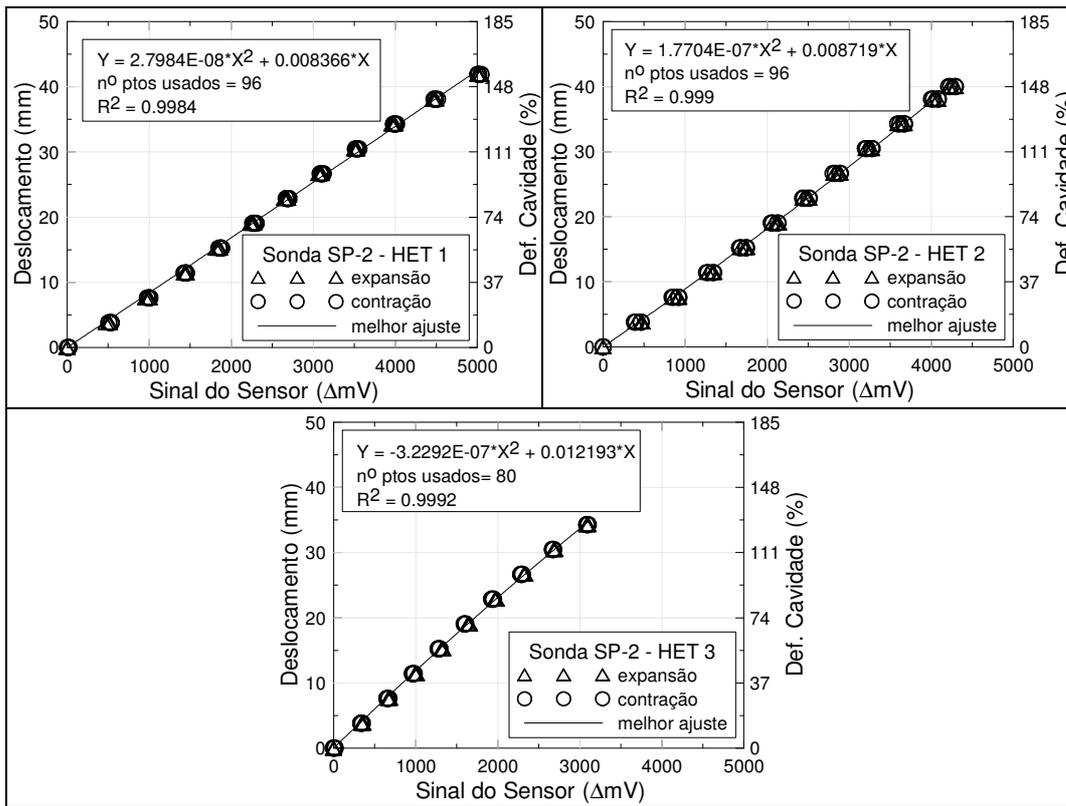


Figura 73 – Resultados da calibração dos transdutores de deslocamentos da sonda SP2.

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)<br>x = ΔmV<br>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.

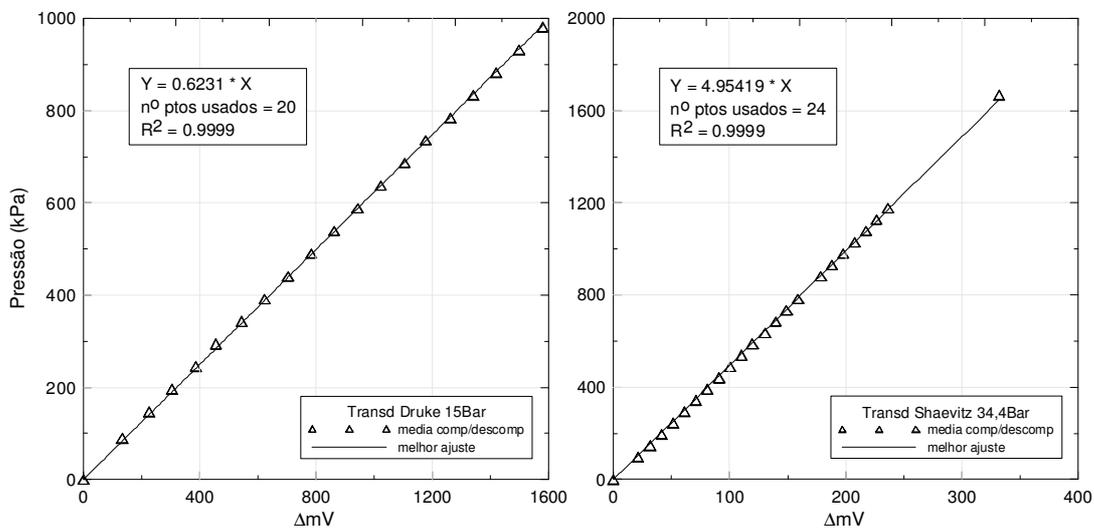


Figura 75 – Resultados das calibrações dos transdutores de pressão.

#### 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.

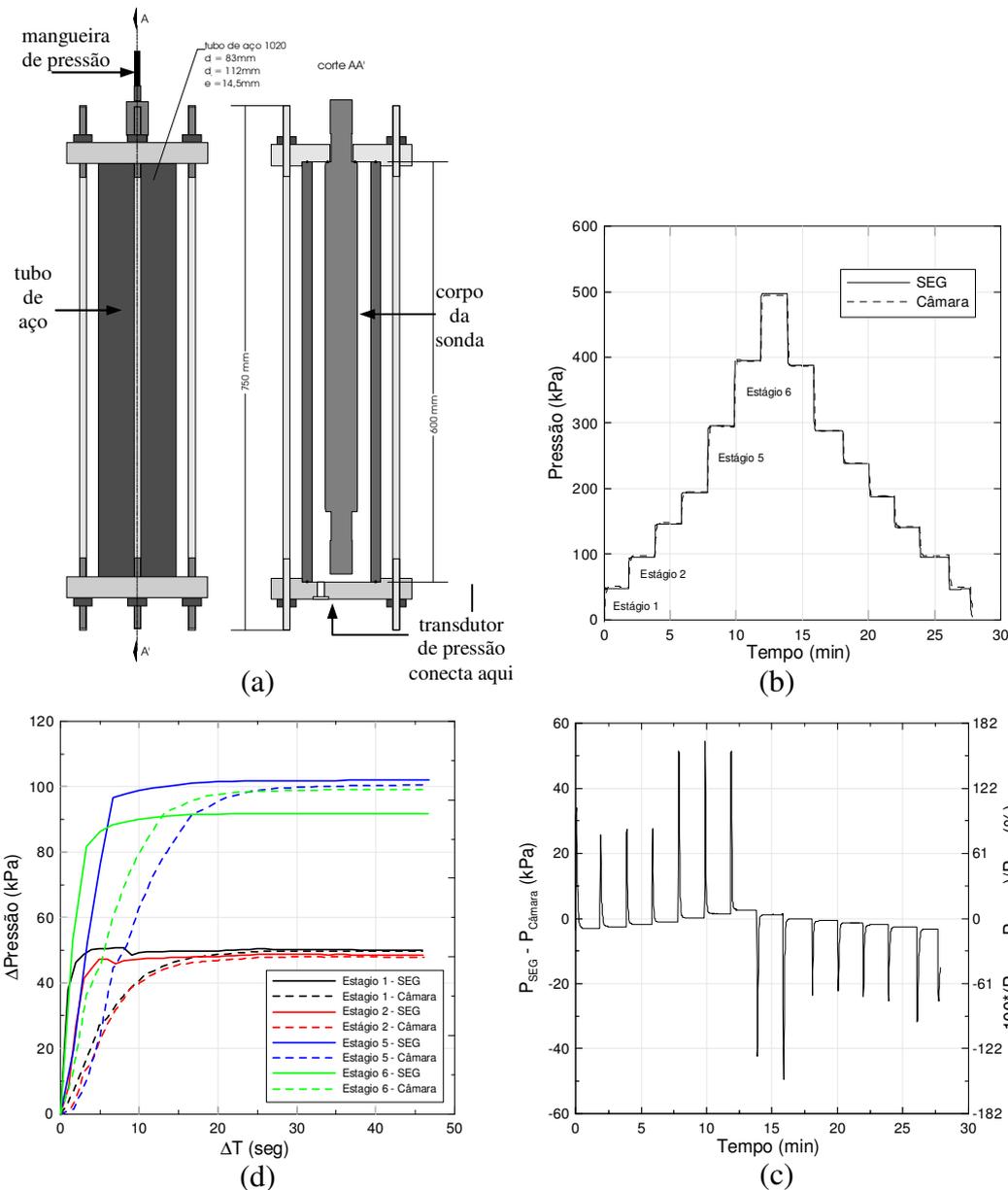


Figura 76 – Detalhe da câmara para aferir velocidade transferência de pressão (a); resultados do ensaios (b),(c) e (d)

#### 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).

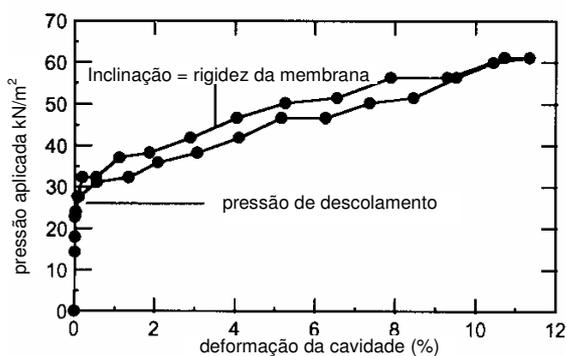


Figura 77 – Exemplo de curva de calibração da rigidez de membranas (Clarke, 1995).

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.

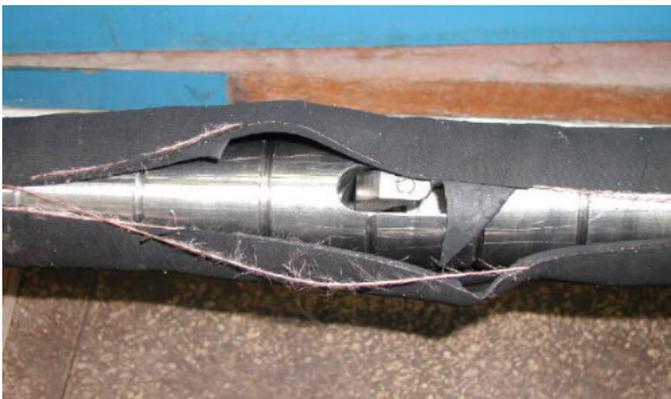


Figura 78 – Membrana após ensaio destrutivo.

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.

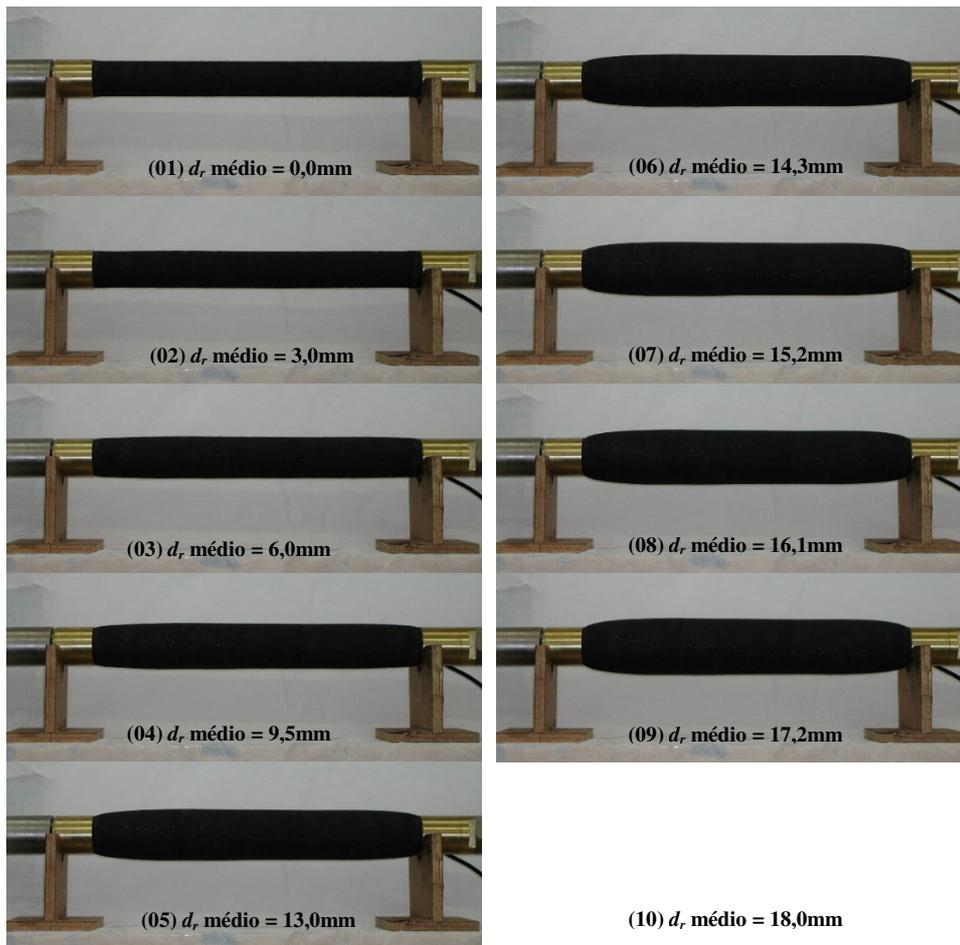


Figura 79 – Estágios de expansão da membrana durante ensaio de calibração da membrana – deslocamento radial ( $d$ ); média de todos os Het's (sonda SP2).

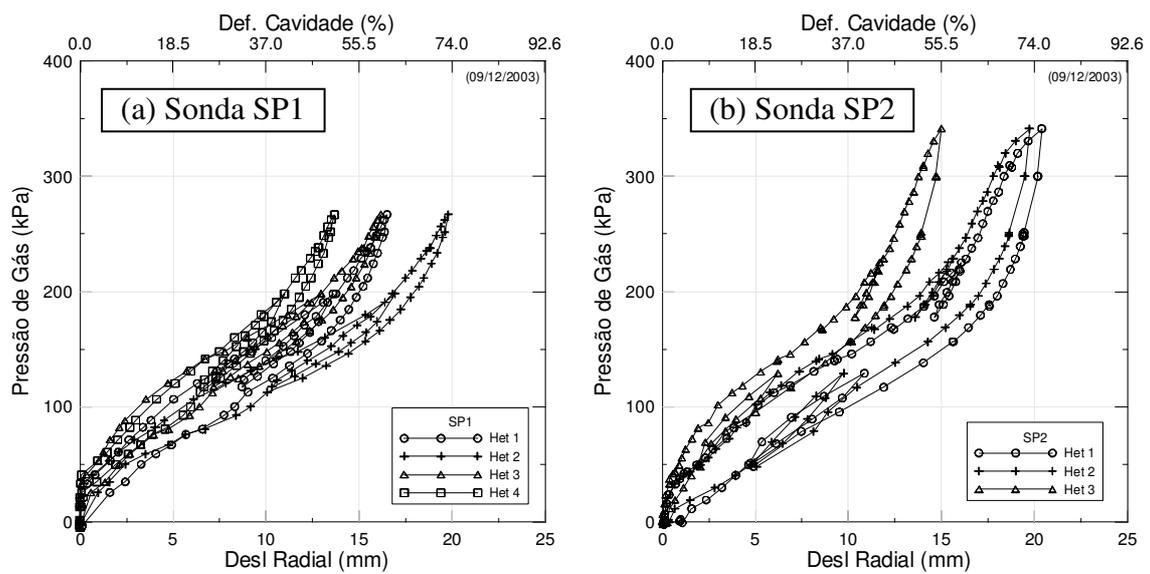


Figura 80 – Deslocamento radial de cada Het na expansão da membrana ao ar.

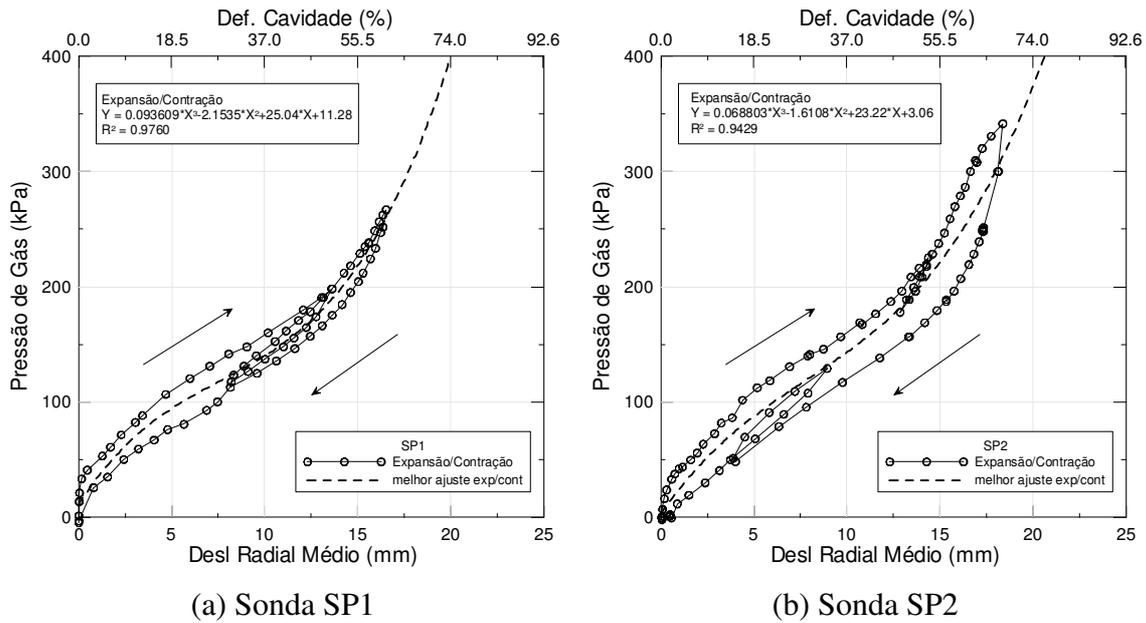


Figura 81 – Curva de ajuste do deslocamentos radiais médios no ensaio de expansão da membrana ao ar.

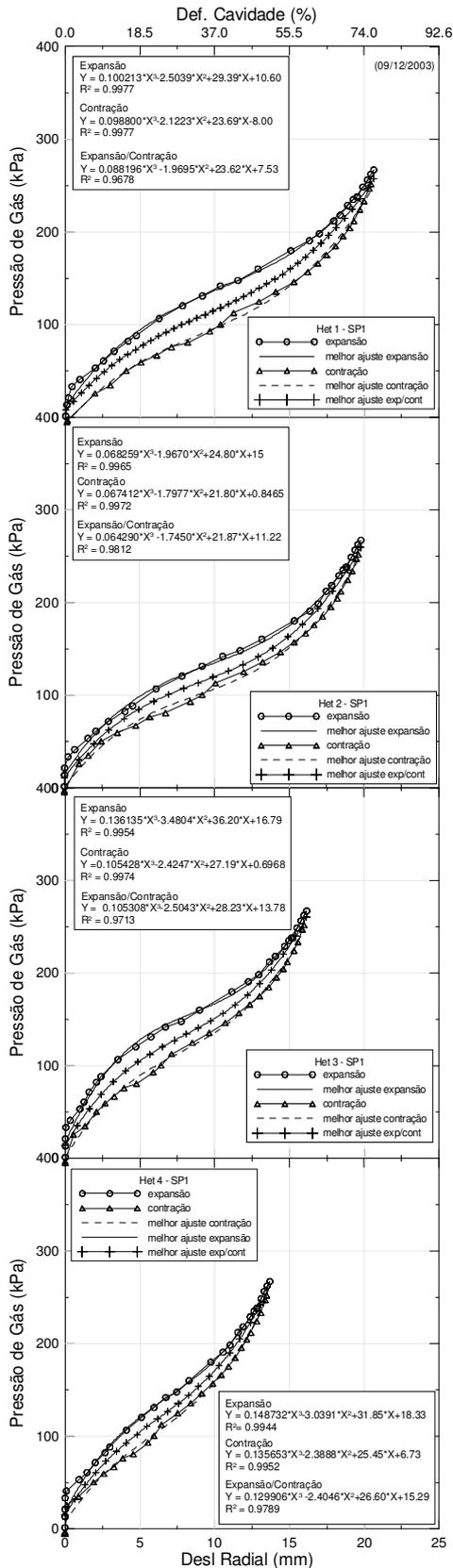
#### 4.6.5.2.

#### Correção do Afinamento da Parede da Membrana

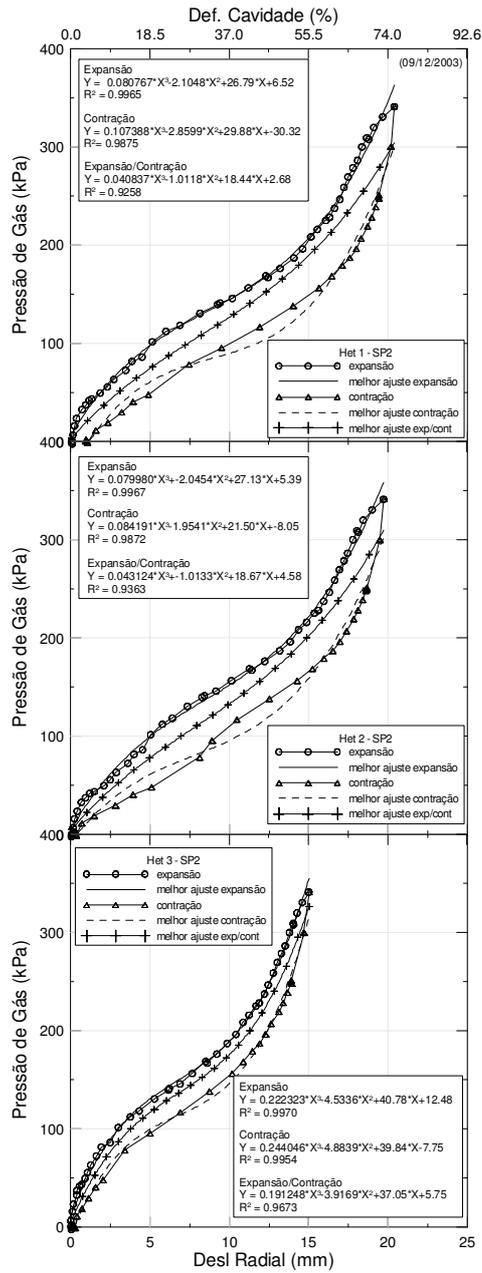
O afinamento da parede da membrana ocorre à medida que ela se expande e é função da variação diametral da membrana e não da variação de pressão.

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%.

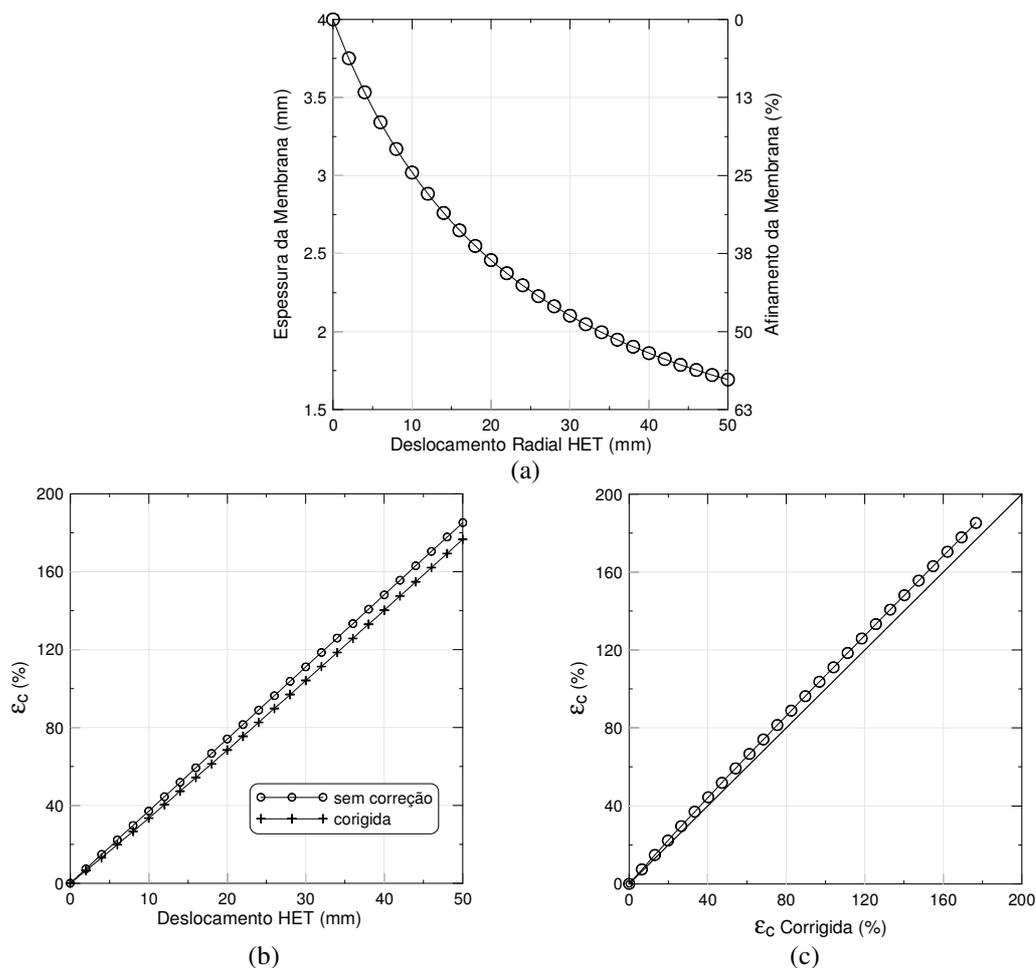


Figura 83 – Afinamento da membrana no PC-RSU segundo teoria de Clarke (1995)