

5 Desenvolvimento do Pressiômetro

5.1.

Introdução

Este capítulo apresenta o equipamento que foi desenvolvido como motivo desta pesquisa, abordando os estudos realizados nas etapas de projeto, procedimento de montagem, sistema de instrumentação e demais informações técnicas pertinentes.

5.2.

Estudo do Projeto

5.2.1.

Fundamentos de Instrumentação

O sistema consta basicamente de três partes principais: O *macaco hidráulico* que é a unidade que injeta pressão de fluido a todo o sistema, o *pressiômetro* que vai aplicar deformação na rocha mediante uma membrana flexível, e o *sistema de aquisição de dados*, formado por medidores de deslocamentos (LVDT's), fonte de alimentação, regulador de voltagem e voltímetro.

A pressão de fluido é gerada através de um macaco hidráulico de braço simples que adicionalmente tem instalado uma válvula para controlar o fluxo de óleo do macaco para o pressiômetro, esta válvula permite fechar o sistema e manter a pressão constante.

Antes de começar a pressurização é necessário tirar o ar que se encontra dentro dos condutos do pressiômetro, para isto, o equipamento é preenchido de óleo e a membrana é pressionada manualmente para permitir a saída das bolas de ar. Posteriormente o preenchimento continua mecanicamente com a ajuda do macaco hidráulico.

A pressurização é realizada em vários estágios de carregamento e descarregamento e o processo de injeção de óleo é feito por etapas. O fluido que é

injetado passa ao pressiômetro pelo eixo principal onde é distribuído para a membrana expansível.

O sistema de aquisição de dados é distribuído da seguinte maneira: a fonte de alimentação primária é conectada a uma tomada comum de 110 volts; esta fonte age como um transformador mudando a voltagem recebida para 10 volts. A fonte de alimentação primária é ligada a um regulador para garantir que todo o sistema funcione com 10 volts. O regulador é conectado a uma caixa seletora de seis canais onde são conectados os LVDT's e o voltímetro (aparelho que registra as variações de voltagem). Quando o sistema fica montado e ligado, são tomadas leituras em vários intervalos de tempo até que os transdutores mostrem leituras de voltagem constantes (chamado tempo de estabilização das leituras).

Depois do tempo de estabilização o sistema esta pronto para realizar a perfuração do furo central (medição das tensões) ou a pressurização do furo (determinação dos parâmetros de deformabilidade).

5.2.2.

Avaliação de Protótipos para o Projeto

Um equipamento inicialmente desenvolvido e fabricado no Canadá serviu de base para o desenvolvimento do equipamento objeto desta pesquisa. Foram feitos vários testes para avaliar seu estado onde foram detectados pontos de vazamento nas conexões e envelhecimento da membrana expansível. Como resultado algumas peças foram adicionadas e outras tiveram que ser trocadas.

Para chegar à configuração final da membrana foram avaliados vários protótipos com diferentes características de composição, flexibilidade e capacidade de expansão.

Os protótipos (apresentados na figura 5.1) foram fabricados pela empresa Adromec. Os primeiros desenvolvidos não cumpriam as condições de flexibilidade e expansibilidade, características necessárias para este tipo de ensaio. Depois de testar varias qualidades de membrana no laboratório, um modelo (o qual demonstrou um bom comportamento as solicitações requeridas) foi testado em campo, mas depois de uma série de testes foi abandonado devido ao pequeno diâmetro externo (46 mm) em comparação com o diâmetro do furo (60 mm), motivo pelo qual o diâmetro externo foi mudado para 52 mm (conforme figura 5.1.c).

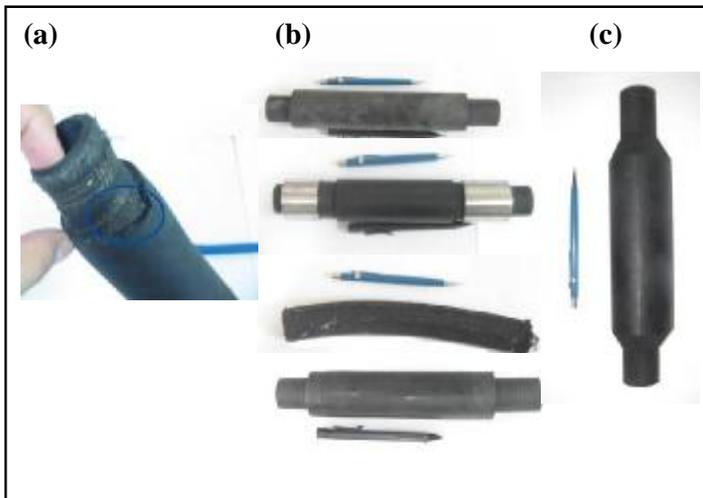


Figura 5.1 – (a)membrana original do equipamento, (b) Protótipos de membrana; (c) protótipo final.

O eixo central que distribui o óleo para dentro da membrana também foi modificado, no momento que a membrana encostava-se na parede, parte da pressão era suportada pelo eixo, produzindo alavanca contra as paredes do furo chegando a quebrar em alguns ensaios. O eixo foi alterado, aumentando a espessura das paredes e o diâmetro externo do mesmo. Com estas modificações a peça ficou mais resistente às pressões solicitadas.

Foram adicionados também anéis aos extremos da membrana para permitir uma melhor fixação dela nas paredes do furo. Os anéis impedem a movimentação em excesso do equipamento mantendo-o fixo e ajudando a aliviar em parte as tensões a que está submetido o aparelho no momento da pressurização uma vez que grande parte da pressão é suportada por estes. O projeto dos anéis também foi modificado progressivamente à medida que o equipamento foi testado; alguns protótipos quebraram durante os testes (figura 5.2.c) e outros foram melhorados até encontrar um protótipo que satisfaça as condições requeridas, o modelo final é mostrado na figura 5.2.d.

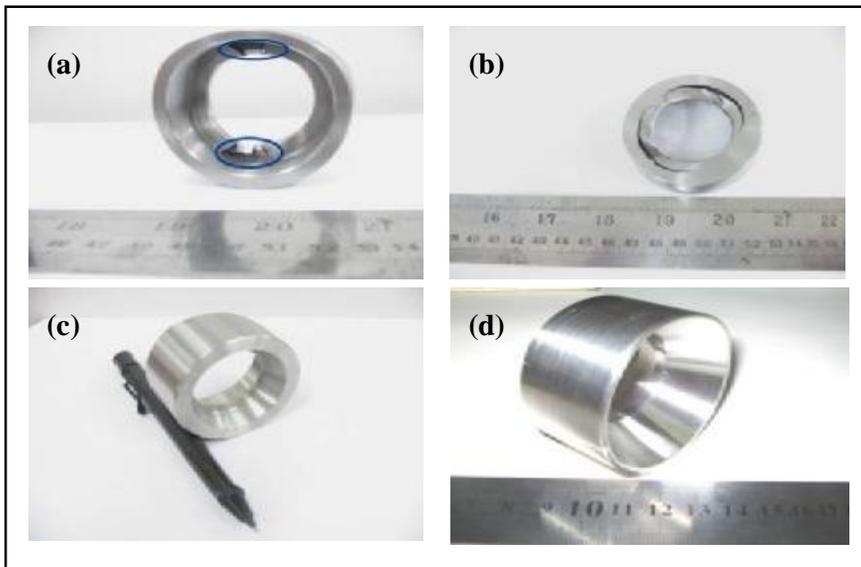


Figura 5.2 – (a), (b) Ruptura dos anéis; (c) segundo protótipo; (d) modelo final.

Um dos acessórios implementados no equipamento foi a camisa de aço parafusada em um dos anéis (tal como mostra a figura 5.3). A camisa foi colocada para ajudar a eliminar o efeito alavanca gerado no momento da pressurização e dissipar as pressões que são suportadas pelo eixo.



Figura 5.3 – Camisa protetora do pressômetro.

5.3.

Características das Partes Constituintes

5.3.1.

Membrana Semiflexível

A membrana semiflexível foi feita de borracha nitrílica apresenta as seguintes dimensões: diâmetro interno de 25,4 mm, diâmetro externo de 52 mm. na parte central e 33 mm. nas laterais. Espessura de parede em condição não deformada de 10,3 mm, e nos extremos uma espessura de 3,8 mm.

A largura da membrana é de 25,95 cm, mas por efeito dos anéis, rosca de fixação, e anéis de fixação do equipamento dentro do furo a parte aproveitável fica reduzida somente a 15,5 cm. Estas dimensões são detalhadas na figura 5.4.

Possui uma dureza na escala shore de 85 a 90 shore A. Nas pontas está reforçada com lona de poliéster para dar-lhe maior resistência. Esta membrana é diferenciada da membrana original por não possuir rede interna de aço, por isso suas características de flexibilidade são menores.

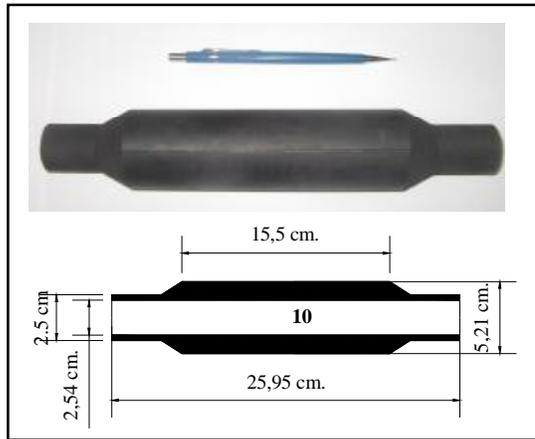


Figura 5.4 – Membrana expansível.

5.3.2.

Anel e Rosca de Fixação da Membrana

A fixação da membrana é feita em cada extremidade. O conjunto todo é constituído pelo anel de fixação (conforme figura 5.5) que é acoplada manualmente nos extremos da membrana e a rosca de fixação (conforme figura 5.6) com ponteira cônica, que pressiona a borracha contra o anel.

O anel de fixação é um corpo metálico com fio interno, cujo diâmetro interior é aproximadamente igual ao diâmetro exterior das extremidades da membrana, apresenta ademais outro fio interno no extremo oposto para permitir o encaixe com o anel de fixação.

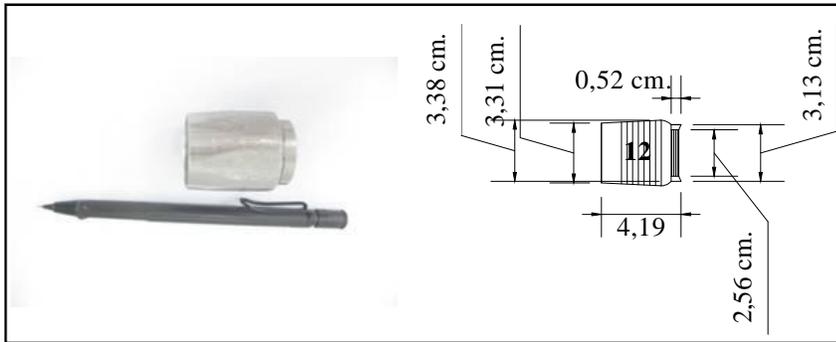


Figura 5.5 – Anel de fixação da membrana expansível.

A rosca de fixação apresenta dois extremos diferentes, o primeiro de ponta cônica vazada que permite pressionar a borracha contra o anel fixando-a, o outro extremo é de seção circular com fio externo que encaixa com o fio interno da rosca de fixação.

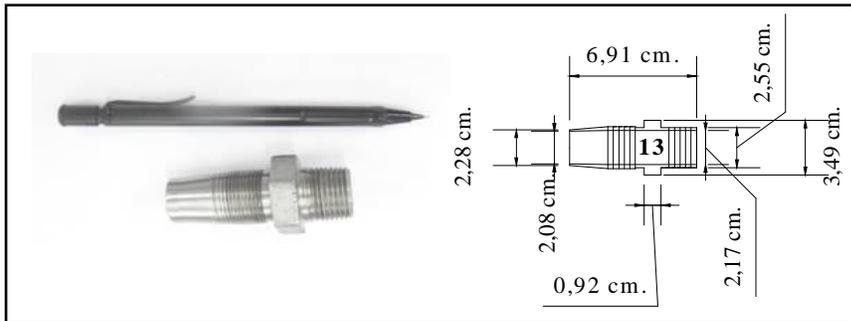


Figura 5.6 – Rosca de fixação da membrana expansível.

5.3.3.

Anéis de Fixação do Equipamento Dentro do Furo

Dois anéis de aço inoxidável foram adicionados ao modelo original do pressiômetro com a finalidade de fixar a membrana às paredes do furo (conforme figura 5.7). As duas faces dos anéis apresentam bordo cônico. Este bordo cônico permite a variação progressiva da espessura das paredes dos anéis, ficando com um diâmetro maior na parte central, permitindo uma melhor resistência às pressões que exercem as paredes do furo aos anéis quando é injetada pressão de fluido.

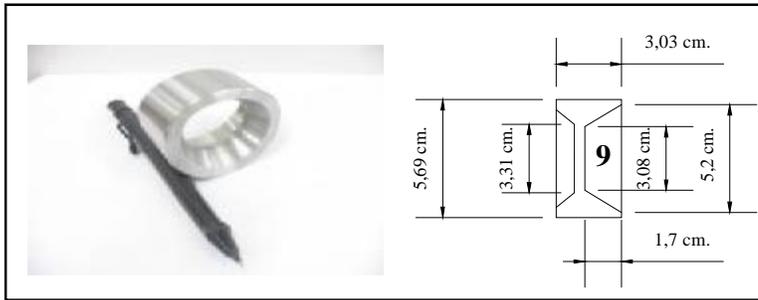


Figura 5.7 – Anel de fixação do equipamento dentro do furo.

5.3.4.

Eixo Central

O tubo ou eixo central é o conduto principal por onde o óleo passa através de todo o equipamento, até a membrana semiflexível. Tem um comprimento total de 49 cm e está feito de aço inoxidável. A peça (conforme figura 5.8) possui roscas nas suas extremidades para permitir a fixação com a rosca de vedação por um lado e pelo outro com os conectores. Na parte central apresenta dois furos por onde o óleo sai em direção à membrana.

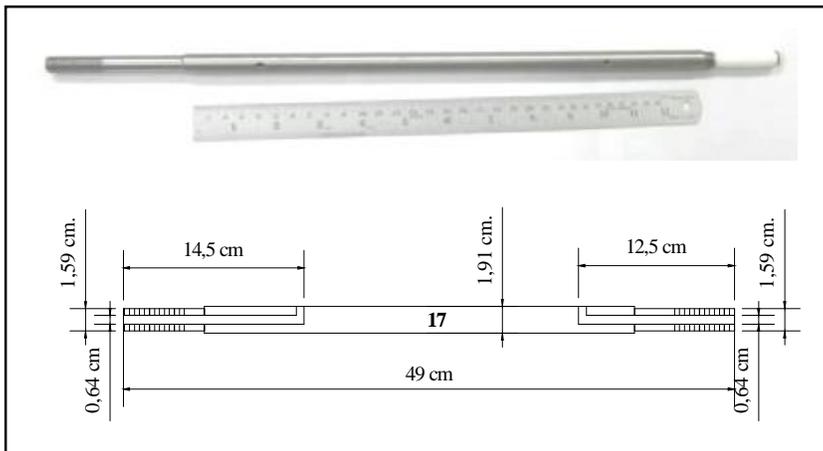


Figura 5.8 – Eixo central do pressiômetro.

5.3.5.

Conectores

Os conectores estão localizados nos dois extremos da membrana, os diâmetros internos e externos variam dependendo das peças adjacentes. O conector inferior (conforme figura 5.9.a) conecta o engate rápido com o eixo central e o conector superior (conforme figura 5.9.b) acopla a parte externa da rosca de fixação do tubo central com a rosca de fixação da membrana.

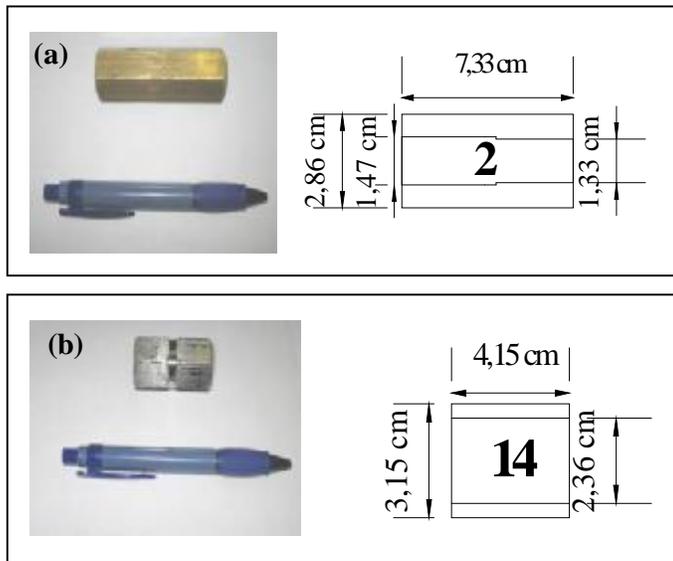


Figura 5.9 – Conector inferior (a) e superior (b).

5.3.6.

Camisa de Apoio

Feita de aço inoxidável é um acessório que vem acoplado a um dos anéis de fixação do equipamento (conforme figura 5.10), sua única função é servir de proteção e apoio ao eixo central contra efeitos de alavanca.

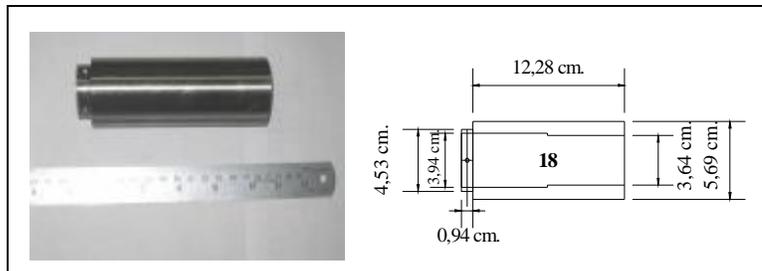


Figura 5.10 – Camisa de apoio do eixo.

5.3.7.

Características das Demais Partes Constituintes

Formam parte do equipamento também: conexão tipo engate rápido (conforme figura 5.11.a) que permite o óleo passar da mangueira do macaco até o corpo do pressômetro; os anéis de vedação (figuras 5.11 b e c) que impedem a saída de óleo pelas roscas e pelos anéis de fixação da membrana; a rosca de fixação do eixo central (figura 5.11.d) que fixa o tubo central ao conector superior, e por último a rosca de vedação (figura 5.11.e) que fecha o circuito de recorrido do óleo.

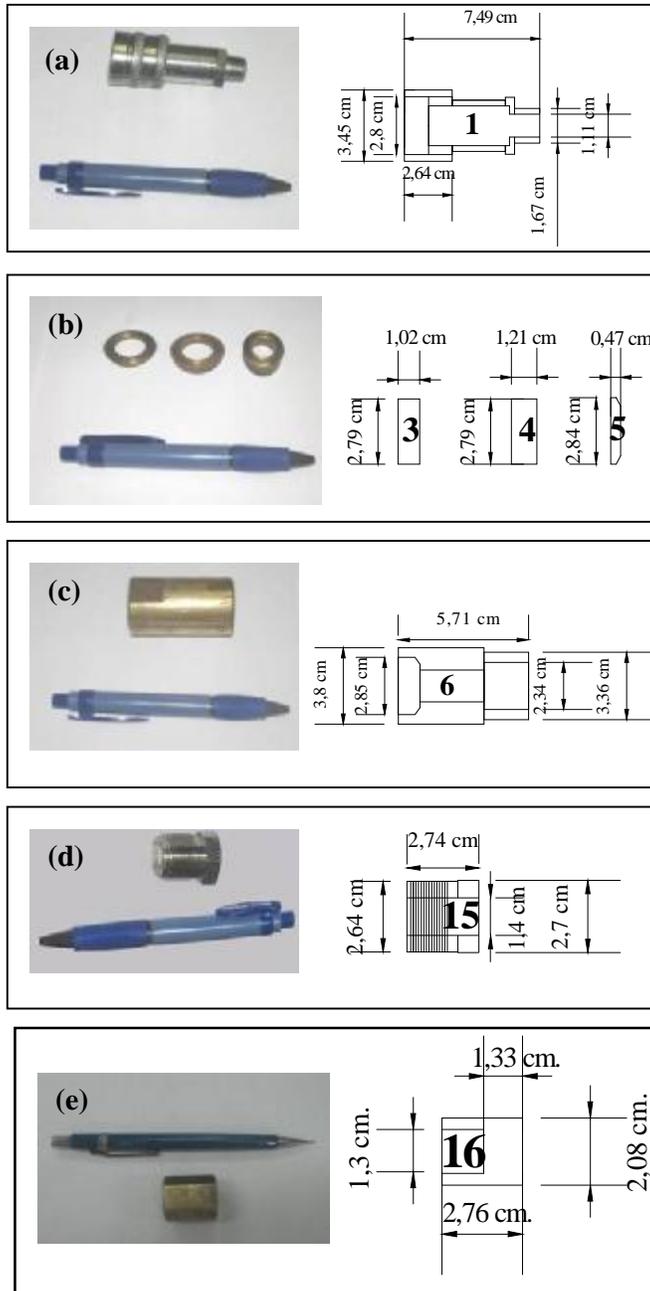


Figura 5.11 – (a) Conexão tipo engate rápido, (b) e (c) anéis de vedação, (d) rosca de fixação do eixo central, (e) rosca de vedação.

5.4.

Montagem do Pressiômetro

A montagem do pressiômetro foi realizada em laboratório, enquanto o restante dos equipamentos foi montado em campo conforme vai executando-se as diferentes etapas dos ensaios.

A primeira etapa na montagem foi a fixação da membrana: primeiro foram colocados os anéis de fixação (peça número 12 da figura 5.12) nos dois extremos, depois foi inserida a rosca de fixação (peça número 13 da figura 5.12) com a ponta cônica vazada para dentro da rosca, desta forma comprime-se a membrana contra a face interna da rosca, até que o fio externo dos anéis encaixe com o fio interno da mesma, depois foi preso todo o conjunto com uma chave ficando a membrana fixa nos dois extremos. Detalhes do sistema de fixação são mostrados na figura 5.12.

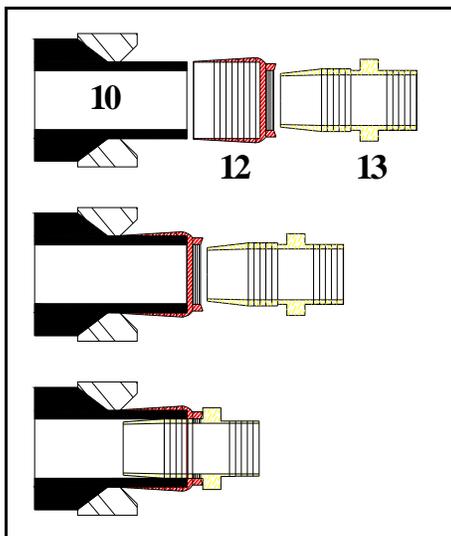


Figura 5.12 – Detalhe do sistema de fixação da membrana expansível.

Logo após foi colocado o conector superior a um dois anéis de fixação, do outro lado foram rosqueados o anel de vedação principal (peça número 6), seguidamente a rosca de fixação do tubo central foi rosqueada ao conector superior.

A segunda etapa é a colocação do eixo central, este foi conectado diretamente à rosca de fixação que já se encontra integrada à membrana como uma peça só, o eixo deve ser inserido, tomando cuidado em deixar suficiente fio para colocar a rosca de vedação.

No outro extremo e já com o eixo preso pela rosca de fixação, foram colocados os anéis de vedação. O conector inferior deve ser rosqueado ao eixo central segurando com uma chave a rosca de fixação (peça número 15) para impedir que no momento da colocação, o eixo fosse afrouxado. Por último o conector tipo engate rápido foi colocado.

A última peça a ser conectada foi a rosca de vedação, a montagem deve ser feita mantendo fixo o conector inferior, delo contrário no momento de prender a rosca de vedação se estará afrouxando o conector do eixo.

Por último é aparafusada a camisa de proteção a um dos anéis. O esquema do pressiômetro com as peças que o compõem é mostrado na seção longitudinal da figura 5.13.

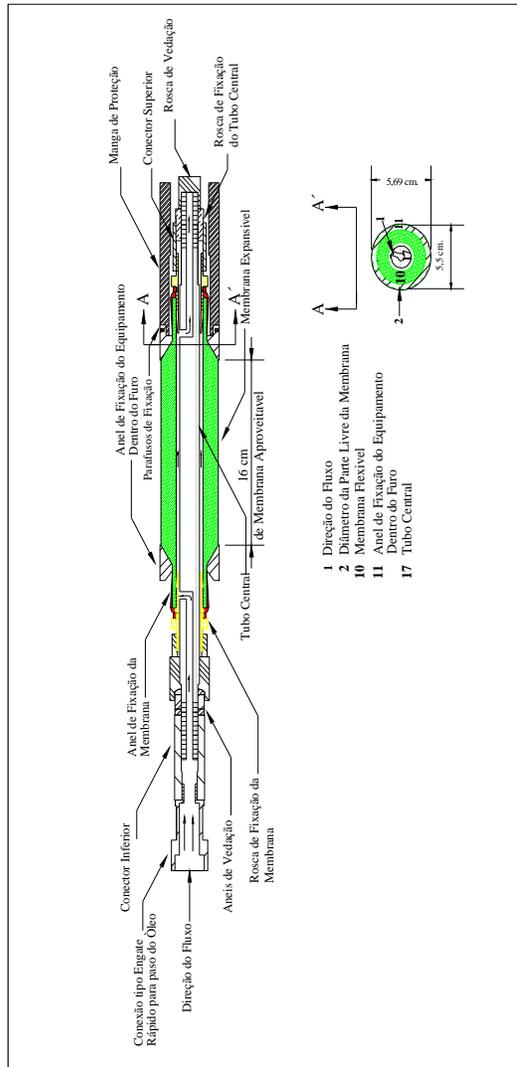


Figura 5.13 – Seção longitudinal do pressiômetro

5.5.

Fonte de Pressão

A fonte de pressão empregada é um macaco hidráulico de braço marca ENERPARC, modelo P-39 (conforme figura 5.14) com capacidade de armazenamento de $655,6 \text{ cm}^3$, fluxo de pressão de 262 cm^3 , pressão máxima de

68.948 MPa e mangueira hidráulica de 2.5 metros com conector de engate rápido para acoplar ao pressiômetro.

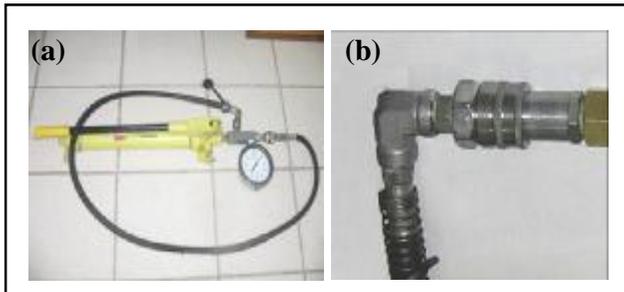


Figura 5.14 – (a) Maçado hidráulico de braço, (b) Detalhe da conexão macaco – pressiômetro.

5.6.

Sensor de Deslocamentos

Para a medição dos deslocamentos optou-se pelo uso de transdutores de tipo LVDT que são sensores para medição de deslocamentos lineares.

O funcionamento deste sensor é baseado em três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético de alta permeabilidade. Este dá como saída um sinal linear, proporcional ao deslocamento do núcleo, que está fixado ou em contato com o que se deseja medir.

A principal vantagem do LVDT sobre outros tipos de sensores de deslocamento é o seu elevado grau de robustez. Este fato é devido à sua própria concepção, pois não existe contacto físico entre o elemento móvel e as partes restantes do sensor. O núcleo apresenta baixa inércia não apresentando desgaste nem folgas (tempo médio entre falhas da ordem dos 300 anos).

Tendo em conta as grandezas dos deslocamentos decidiu-se pelo modelo PY2 fabricado pela Gefran (ver figura 5.15). Entre suas características principais estão: curso eletrônico útil (CEU) de 10mm, suporte duplo para a haste de controle e mola de retorno, linearidade independente de até $\pm 0,1\%$, velocidade de deslocamento de até 10 m/s, temperatura de operação: -30 a $+100^{\circ}\text{C}$, Expectativa de vida: $> 100 \times 10^6$ operações (dentro do CEU).

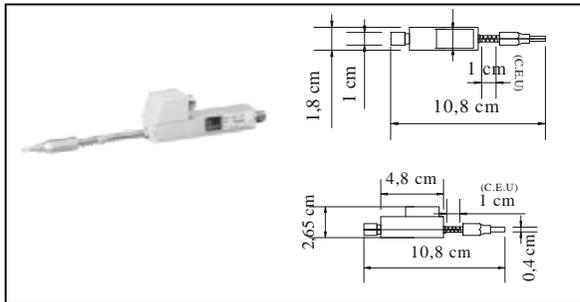


Figura 5.15 – Sensores de deslocamento (LVDT) modelo PY2.

5.7.

Sistema de Aquisição de Dados

5.7.1.

Fonte de Alimentação e Regulador de Voltagem.

A alimentação primária é obtida a partir de uma fonte de alimentação Tektronik modelo PSY281 (figura 5.16.a) que funciona com 110 Volts com voltagem de saída na faixa de 0 a 30 Volts e de 0 a 3.0 amperes. A saída desta fonte é estabilizada por um regulador (figura 5.16.b) que fornece uma saída de 10 volts estabilizada em relação à variação de carga e temperatura.

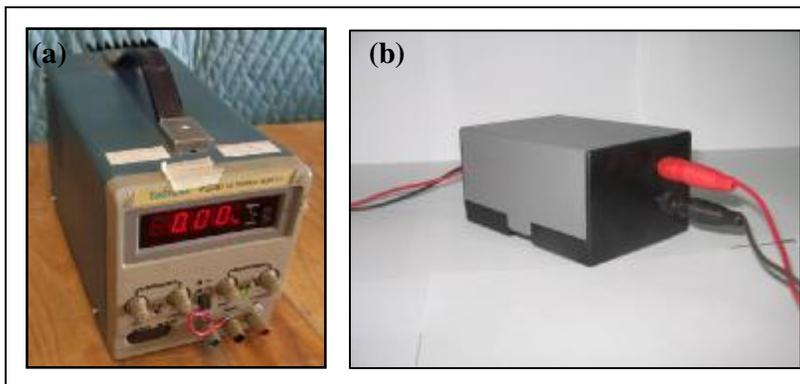


Figura 5.16 –(a) Fonte de alimentação primária, (b) regulador de voltagem.

5.7.2.

Voltímetro

O volímetro usado para registrar as variações de voltagem é um multímetro digital marca Analogic DP100 (conforme figura 5.17) de 5 e meio dígitos com resolução de até 10^{-5} volts ($10mV$).



Figura 5.17 – Multímetro digital para registro das variações de voltagem.

5.7.3.

Caixa Seletora

A seleção do LVDT a ser lido foi feita através de uma caixa seletora (Ver figura 5.18) de seis canais, que mantinha permanentemente alimentados todos os LVDT's a ela conectados.

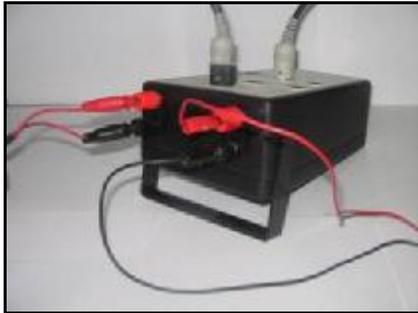


Figura 5.18 – Caixa seletora de 6 canais.

5.8.

Calibração do Equipamento

5.8.1.

Calculo de Perda de Pressões por Efeito da Rigidez da Membrana

A rigidez é a capacidade de um objeto sólido ou elemento estrutural de suportar tensões sem adquirir grandes deformações ou deslocamentos.

A rigidez da membrana é a pressão necessária para deformá-la ao ar, sua avaliação é necessária para saber quanto da pressão aplicada é requerida no processo de expansão livre da membrana.

5.8.1.1.

Pressão Transmitida ao Cilindro de Aço

Para estimar á perdas de pressão por efeito da rigidez da membrana foram feitos testes de pressurização em tubos de aço. Para o calculo da perda de pressão

foi utilizada a teoria de tensões e deslocamentos em um cilindro de parede espessa em deformação plana (ver figura 5.19), (Figueiredo, 2007).

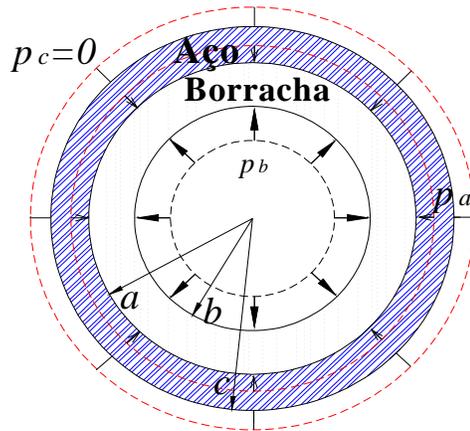


Figura 5.19 – Interação borracha-aço.

Sejam:

a = raio interno do cilindro e aço;

b = raio interno do cilindro de borracha;

c = raio externo do cilindro de aço;

p_a = pressão transmitida à parede interna do cilindro de aço;

p_b = pressão interna aplicada no cilindro de borracha;

p_c = pressão externa;

E_a e E_b = módulos de elasticidade do aço e da borracha, respectivamente;

G_a e G_b = módulos de cisalhamento do aço e da borracha, respectivamente;

I_a e I_b = parâmetros de Lamé do aço e da borracha, respectivamente;

n_a e n_b = coeficientes de Poisson do aço e da borracha, respectivamente.

As expressões gerais para as tensões radiais (S_r) e circunferências (S_q) em um cilindro de parede espessa com raio interno b e externo a , com pressões interna e externa, respectivamente, p_b e p_a , são (Jaeger & Cook, 1979):

$$S_r(r) = \frac{p_a a^2 - p_b b^2}{(a^2 - b^2)} \mathbf{m} \frac{(p_a - p_b) a^2 b^2}{r^2 (a^2 - b^2)} \quad 5.1$$

Onde r é a coordenada radial.

Já os deslocamentos radiais (u) são dados por (Jaeger & Cook, 1979):

$$u(r) = \frac{(p_a a^2 - p_b b^2) r}{2(I + G)(a^2 - b^2)} + \frac{(p_a - p_b) a^2 b^2}{2G(a^2 - b^2) r} \quad 5.2$$

No caso de um problema assimétrico as deformações radiais (e_r) e circunferências (e_q) são dadas por (Jaeger & Cook, 1979):

$$e_r(r) = \frac{du}{dr} \text{ e } e_q(r) = \frac{u}{r} \quad 5.3$$

Por compatibilidade de deformações das circunferências em $r = a$ (interface dos cilindros de borracha e aço) devemos ter:

$$u(r=a)|_{\text{aço}} \equiv u(r=a)|_{\text{borracha}}$$

$$\begin{aligned} \text{Tem-se: } u(r=a)|_{\text{borracha}} &= \frac{(p_a a^2 - p_b b^2)r}{2(I_b + G_b)(a^2 - b^2)} + \frac{(p_a - p_b)a^2 b^2}{2G_b(a^2 - b^2)r} = \\ &= \frac{(p_c c^2 - p_a a^2)r}{2(I_a + G_a)(c^2 - a^2)} + \frac{(p_c - p_a)c^2 a^2}{2G_a(c^2 - a^2)r} = u(r=a)|_{\text{aço}} \end{aligned} \quad 5.4$$

Desenvolvendo a igualdade acima para explicitar p_a no membro direito da igualdade, tem-se a desejada expressão para a pressão transmitida à face interna do cilindro de aço, em função da pressão interna no cilindro de borracha, p_b , dos parâmetros geométricos dos cilindros e constitutivos do aço e da borracha conforma a equação 5.5.

$$p_a = \frac{\frac{p_b b^2}{(a^2 - b^2)} \left\{ \frac{1}{I_b + G_b} + \frac{1}{G_b} \right\}}{\frac{1}{(a^2 - b^2)} \left[\frac{a^2}{I_b + G_b} + \frac{b^2}{G_b} \right] + \frac{1}{(c^2 - a^2)} \left[\frac{a^2}{I_a + G_a} + \frac{c^2}{G_a} \right]} \quad 5.5$$

Um caso particular da expressão acima é considerar o coeficiente de Poisson da borracha igual a meio ($n_b = 0.5$). Com isso tem-se $I_b \approx \infty$ e $G_b = E_b/3$. Assim, teremos:

$$p_a = \frac{\frac{p_b b^2}{(a^2 - b^2)} \left\{ \frac{3}{E_b} \right\}}{\frac{1}{(a^2 - b^2)} \left[\frac{3b^2}{E_b} \right] + \frac{1}{(c^2 - a^2)} \left[\frac{a^2}{I_a + G_a} + \frac{c^2}{G_a} \right]} \quad 5.6$$

Particularizando para o caso em que o coeficiente de Poisson do aço $n_a = 0.25$ (daí $I_a = G_a$ e $G_a = 2E_a/5$) a equação 5.6 é simplificada como:

$$p_a = \frac{\frac{3p_b b^2}{(a^2 - b^2)}}{\frac{3b^2}{(a^2 - b^2)} + \frac{a^2 + 2c^2}{(c^2 - a^2)} \left[\frac{5E_b}{4E_a} \right]} \quad 5.7$$

As dimensões do tubo de aço, da membrana e os parâmetros mecânicos de ambos são especificados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores usados para o cálculo da pressão transmitida ao aço.

a (m)	c (m)	b (m)	p_b (MPa)	E_a (MPa)	E_b (MPa)	u_b	u_a
0.0295	0.0317	0.0127	15	210000	525	0.49999	0.25

$$I_a = \frac{E_a \cdot u_a}{(1 + u_a) \cdot (1 - 2 \cdot u_a)}; \quad I_a = 8.4 \times 10^4 \quad 5.8$$

$$I_b = \frac{E_b \cdot u_b}{(1 + u_b) \cdot (1 - 2 \cdot u_b)}; \quad I_b = 7.88 \times 10^{17} \quad 5.9$$

$$G_a = \frac{E_a}{2 \cdot (1 + u_a)}; \quad G_a = 8.4 \times 10^4 \quad 5.10$$

$$G_b = \frac{E_b}{2 \cdot (1 + u_b)}; \quad G_b = 175 \quad 5.11$$

Aplicando a formulação *de parede espessa* caso de deformação plana (Eq. 5.5) o valor da pressão transmitida ao cilindro de aço fica: $P_a = 13.662$ MPa, o que quer dizer que aproximadamente 91,1% da pressão de P_b é transmitida ao cilindro de Aço. Para os casos especiais onde $u_b = 0.5$ e $u_a = 0,25$ aplicando as equações 5.6 e 5.7 os valores de P_a foram os mesmos.

5.8.1.2.

Pressão Transmitida à Rocha

Para estimar a pressão transmitida à rocha pelo pressômetro (conforme figura 5.20) tem que se aplicar a seguinte formula:

$$p_b = \frac{\frac{3 \cdot p_b \cdot b^2}{(a^2 - b^2)}}{\left[\frac{3 \cdot b^2}{(a^2 - b^2) \cdot Eb} \right] + \frac{1}{Gr}} \quad 5.12$$

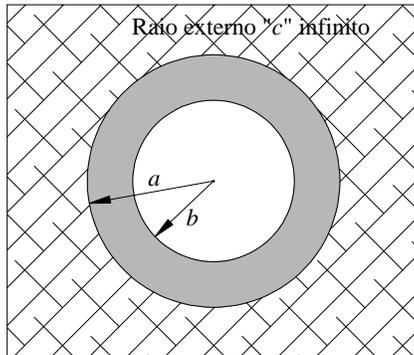


Figura 5.20 – Interação borracha- rocha.

Onde:

a = raio interno do furo na rocha (m);

b = raio interno do cilindro de borracha (m);

p_r = pressão transmitida à rocha pelo pressiômetro (MPa);

p_b = pressão interna aplicada no cilindro de borracha (MPa);

G_r = módulo cisalhante da rocha (MPa);

E_r = módulo de elasticidade da rocha (MPa);

E_b = módulo de elasticidade da borracha (MPa);

ν_r = coeficiente de Poisson da rocha;

c_r = raio externo da rocha considerada infinita.

Tabela 5.2 – Valores usados para o calculo da pressão transmitida à rocha pelo pressiômetro.

a (m)	c_r (m)	b (m)	p_b (MPa)	E_r (MPa)	E_b (MPa)	ν_r
0.03	Infinito	0.0127	15	15200	525	0.20

Finalmente o valor da pressão p_r calculado foi de 14. 87 MPa o que dá que 99,1% da pressão gerada pela injeção de fluido é transmitida à rocha. Conclui-se que não é necessário considerar a calibração da membrana, pois sua rigidez quase não afeta a pressão interna produzida pelo pressiômetro.

5.8.2.

Calibração dos Transdutores

5.8.2.1.

Metodologia Empregada

A calibração foi feita usando um equipamento eletrônico para medir distâncias com sensibilidade de 0,001 micras. Para o registro da voltagem foi utilizado um voltímetro conectado a uma fonte de alimentação e a um regulador de energia. As leituras foram de ida e volta, tomadas desde a metade do CET (Curso Eletrônico Útil) a cada 0,005 mm.

5.8.2.2.

Resultado das Calibrações

Na figura 5.21 se apresenta as curvas com os resultados das calibrações para as medidas de ida e volta do CET. O gráfico apresenta valores feitos a partir das variações de voltagem em função da distância.

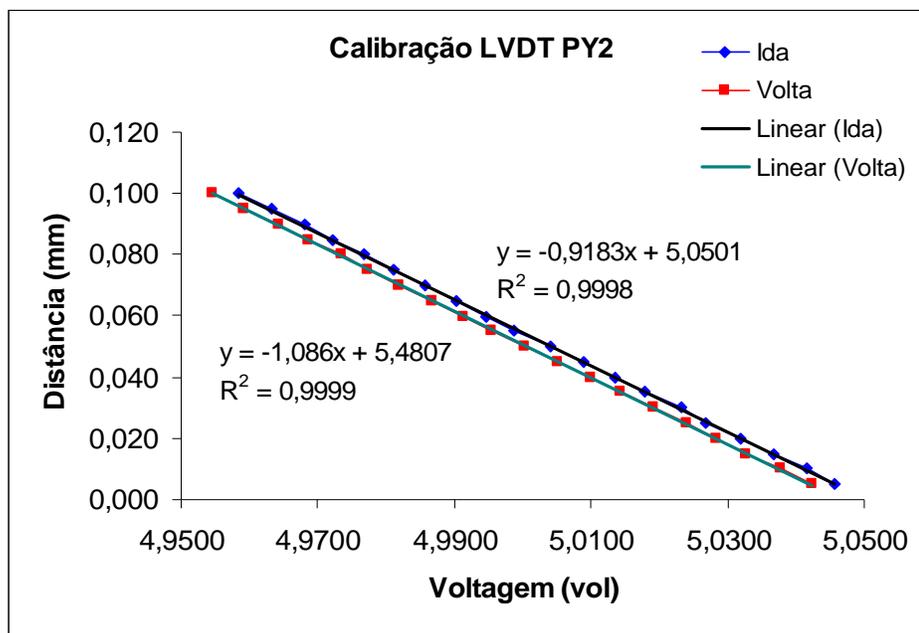


Figura 5.21 – Curva de calibração do LVDT PY2.

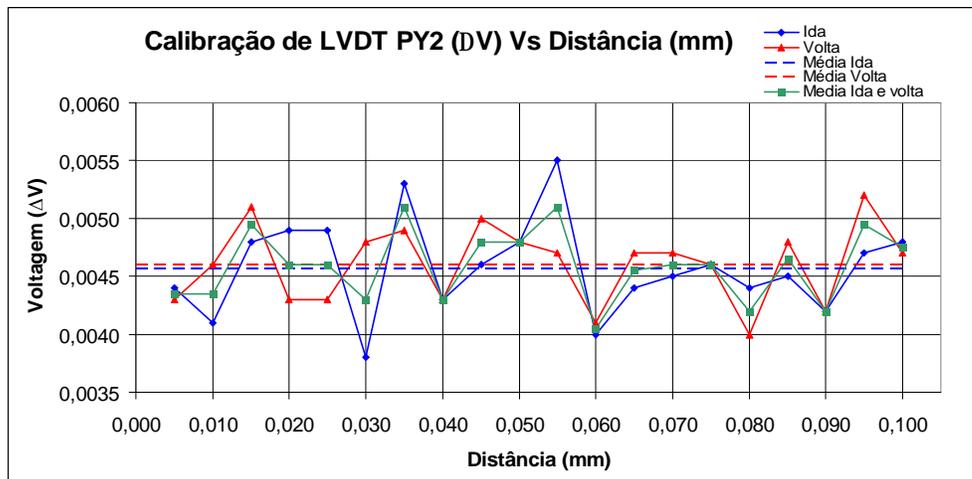


Figura 5.22 – Variação da voltagem em função da longitude para o LVDT PY2.

A elaboração da curva de calibração foi feita com base nas variações de voltagem e das distâncias. Tomou-se uma média das variações de voltagem de ida (mDV_i) e de volta (mDV_f), fazendo-se pela sua vez uma média aritmética entre os dois valores, equação 5.13:

$$\Delta V_f = \frac{(m\Delta V_i + m\Delta V_f)}{2} \quad 5.13$$

A equação da reta é dada pela equação 5.14.

$$\Delta L = a\Delta V_f \quad 5.14$$

Onde a é a inclinação da reta; ΔL são as variações de distâncias as quais são constantes para qualquer valor de ΔV_f (o intervalo de medidas se repetiu em todas as leituras, no valor de 0,005); ΔV_f seria dada pela equação 5.13 cujo valor é igual a $4,59 \cdot 10^{-3}$.

Assim a equação de calibração para PY2 ficaria dada pela equação 5.15

$$\Delta L = 1,089\Delta V \quad 5.15$$

Como na calibração só foi tomada uma parte do CET e a equação deve ser aplicável para o comprimento total do CET, então não foi tomada a parcela b da equação geral da reta ($y = ax + b$).