3
Desenvolvimento do Permeâmetro

Os permeâmetros que empregam o método da vazão constante determinam a condutividade hidráulica do meio através da medição da carga hidráulica induzida no meio por intermédio de uma vazão imposta por uma bomba na superfície (Butler *et.al*., 2007).

Este tipo de sistema de medição tem sido recentemente criado empregando-se transdutores de pressões posicionados longitudinalmente e/ou circunferencialmente ao longo da sonda (Butler *et al*., *op. cit*.). A Figura 3.1 apresenta o permeâmetro que está sendo desenvolvido pela Geoprobe Systems.

Figura 3.1 – Permeâmetro da Geoprobe Systems

A presente pesquisa buscou atender os seguintes requisitos operacionais:

1. Sonda de fácil cravação;
2. Utilização de materiais de elevada resistência mecânica e à corrosão na construção da sonda;
3. Possibilidade de saturação do meio poroso;
4. Possibilidade de saturação da linha de injeção;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

5. Possibilidade de saturação das linhas de medição de poropressão para minimizar a permanência de bolhas de ar na cavidade de medição;

6. Possibilidade de injeção de fluxo radial;

7. Possibilidade de injeção de vazões da ordem de 1 x 10^{-4} cm^3/s para permitir a realização de ensaios em solos argilosos com gradientes hidráulicos inferiores a unidade;

8. Possibilidade de medição contínua da vazão de injeção;

9. Os pontos de medição da poropressão deverão estar o mais próximo o possível do ponto de injeção para que a constatação das condições de fluxo permanente sejam realizadas em um menor intervalo de tempo, reduzindo o tempo do ensaio;

10. Possibilidade de troca do filtro das portas de medição da poropressão para minimizar a perda de carga;

11. Possibilidade de aquisição automática e armazenamento dos sinais dos transdutores empregados na medição de vazão e poropressão;

12. Possibilidade de acompanhamento gráfico temporal dos dados adquiridos para definição do término do ensaio

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

3.1. Características do material de confecção

3.1.1. Aço Inox

O aço inox utilizado para a fabricação do Permeâmetro foi o 316. Este é um tipo de aço resistente a corrosão, dado a presença de cromo que possui uma grande afinidade com o oxigênio e ao reagir com este forma uma capa passiva, evitando assim a corrosão do ferro. Esta liga contém por especificação um mínimo de 10,5% de cromo. O aço inoxidável 316 pertence ao grupo dos aços austenicos os quais possuem as seguintes características (ASTM TP 316 L):

- Excelente resistência a corrosão
- Excelente soldabilidade
- Excelente fator de higiene e limpeza

- Possui a habilidade de funcionar em temperaturas extremas, em baixas temperaturas prevenindo a fragilização e altas temperaturas até os (925º).
- São não magnéticos.

3.2. Projeto do permeâmetro

O permeâmetro consiste em uma sonda cravada e emprega o método da vazão constante. Uma bomba de seringa instalada na superfície do terreno é utilizada para aplicar uma vazão constante enquanto que a carga hidráulica induzida no meio é medida através de um transdutor de pressão piezoresistivo instalado no corpo da sonda, vide Figura 3.2.

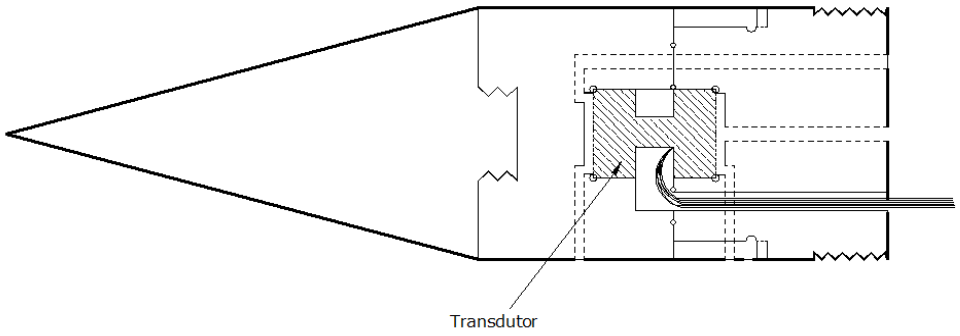

Figura 3.2 Detalhe da posição do transdutor

A diferença dos outros equipamentos antes citados este equipamento tem a vantagem de permitir o escoamento em suas linhas de drenagem e de medição de carga hidráulica a partir da superfície possibilitando a saturação do meio poroso após a cravação da sonda bem como minimizando as incertezas associadas à medição de pressão. Esta última é alcançada através de um transdutor diferencial de pressão com uma faixa de trabalho de 10kPa que possibilita medições de poropressões bem próximas a zona de injeção, conforme pode ser visto na Figura 3.2. Esta característica permite a realização de ensaios mais curtos e minimiza o problema de compatibilidade de fluidos decorrente do processo de injeção.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

A ponta cônica, vista na Figura 3.3, possui um ângulo de ataque de 30º diferindo do padrão internacional de 60º que é usado nos ensaios do tipo CPTU. O ângulo de ataque foi determinado com base nas análises da propagação das taxas de deformação devido à penetração realizadas por Levadoux e Baligh (1986).

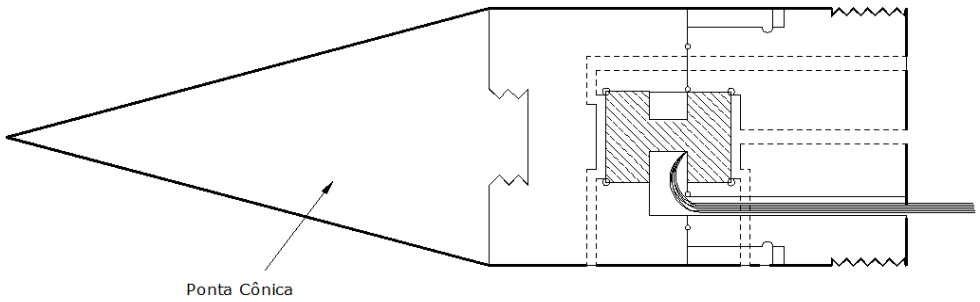

Figura 3.3 Detalhe da ponta cônica de 30º do Permeâmetro de cravação.

Segundo estes autores, quanto menor for o ângulo da ponta do cone menor serão as deformações e perturbações produzidas. Adicionalmente, quanto menor for o ângulo de ataque menor será a poropressão induzida pela penetração do instrumento como também o tempo necessário a sua equalização será mais rápido.

3.3. Construção do permeâmetro

A construção do Permeâmetro foi realizada no Instituto Tecnológico (ITUC/PUC-Rio), onde foi torneado em quatro peças cilíndricas em aço inoxidável 316 de alta resistência à corrosão.

As dimensões gerais externas do permeâmetro de 187 mm de comprimento e 54 mm de diâmetro externo como se mostra na Figura 3.4. As Figuras 3.5 e 3.6 ilustram as partes constituintes do permeâmetro.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

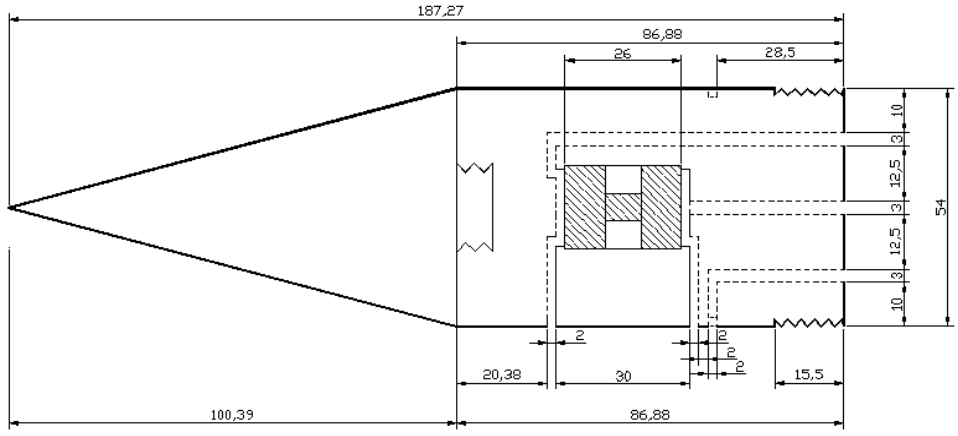

Figura 3.4 Dimensões do Permeâmetro de cravação

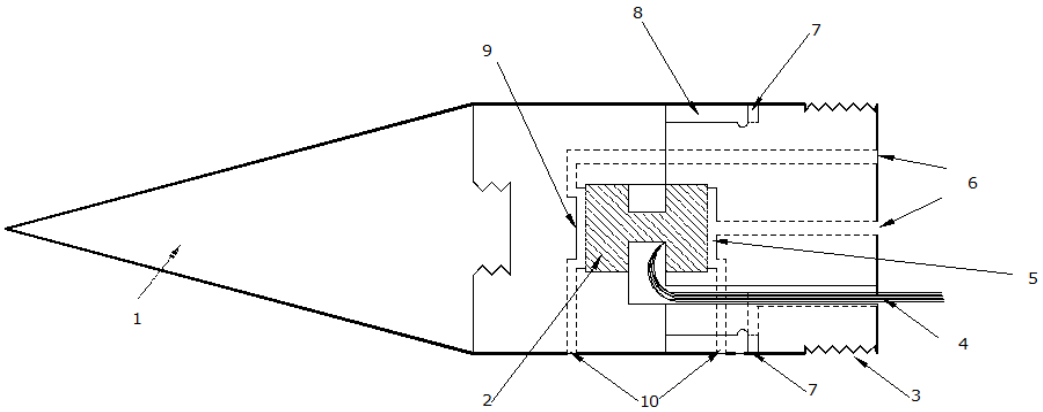

Figura 3.5 Diagrama esquemático do permeâmetro de cravação

Figura 3.6 Detalhe das partes constituintes do Permeâmetro de cravação

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

A primeira peça torneada foi à cavidade localizada na posição 2 (Figura 3.5),a qual é mostrada na Figura 3.7. O diâmetro do furo foi de 19 mm para proporcionar a colocação do transdutor diferencial de pressão, conforme pode ser visto na Figura 3.8.

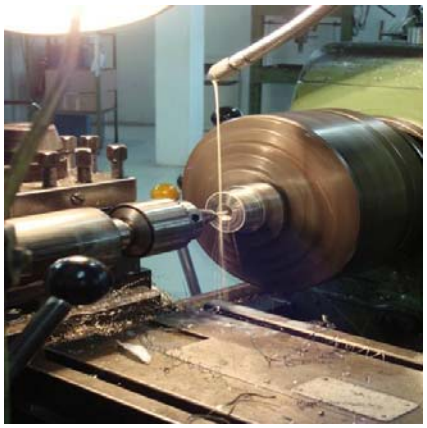

Figura 3.7 Detalhe da perfuração do furo longitudinal para dar acesso a transdutor de pressões

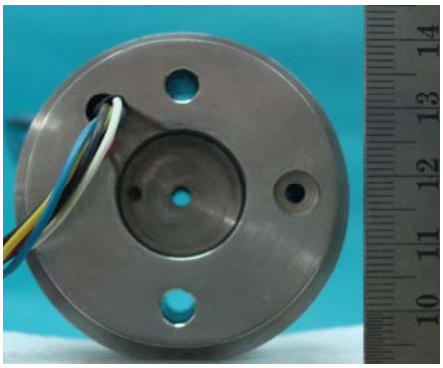

Figura 3.8 Detalhe do furo onde é colocado o transdutor diferencial

O corpo do permeâmetro possui duas roscas de 2 mm nas extremidades para facilitar as conexões do sistema de fixação, como é o caso da ponta cônica localizado na posição 1 (Figura 3.5) e o adaptador das hastes de cravação localizado na posição 3 (Figura 3.5).

Um anel complementar, visto em construção na Figura 3.9, foi projetado para acomodar um disco poroso localizado na posição 7 (Figura 3.5). Este anel possui 4mm de largura e 16.05mm de comprimento. Neste mesmo anel, está

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

instalado uma das portas de drenagem para a medição da poropressão, conforme pode ser vista na Figura 3.10.

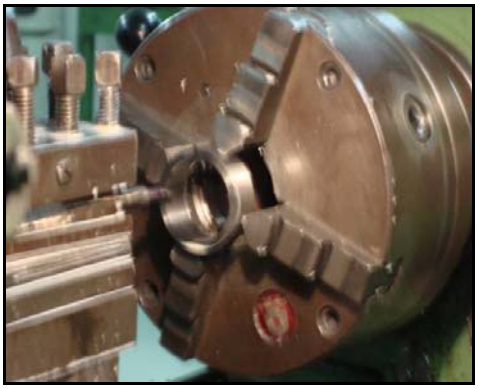

Figura 3.9 Perfuração do anel complementar

Figura 3.10 Perfuração do anel complementar

O pemeâmetro desenvolvido possui duas placas porosas de 2 mm de largura e de diâmetro de 17 mm fabricadas de um material de viton, as quais se encontram localizadas nas posições 5 e 9 (Figura 3.5). A sua instalação é feita conforme ilustra a Figura 3.11.

Figura 3.11 detalhe da placa porosa posição 9

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

A Figura 3.12 apresenta a forma na qual as partes são conectadas (*i.e.*, através de parafusos). Há ainda um furo adicional por onde a fiação do transdutor de pressão é levada à superfície.

Figura 3.12 Detalhe dos parafusos e do furo para a passagem dos fios do transdutor

O permeâmetro montado é apresentado na Figura 3.13.

Figura 3.13 Permeâmetro confeccionado com aço 316

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

3.4.
Detalhes das peças constituintes

3.4.1.
Ponta cônica

A ponteira cônica de aço inoxidável possui um ângulo de ataque de 30º, diâmetro externo de 54mm e a área da total de 11,40 cm^2. A ponta é atarraxada à extremidade da sonda, ficando em contato com a rosca de fixação da segunda peça conforme pode ser visto no Apêndice I, no plano 1.

O objetivo desta ponteira é de auxiliar na cravação do Permeâmetro e servir de espaçador diminuindo a perturbação do solo durante a cravação. As Figuras 3.14, 3.15 e 3.16 apresentam seqüencialmente a confecção da ponta e da rosca.

Figura 3.14 Detalhe da confecção da ponta cônica

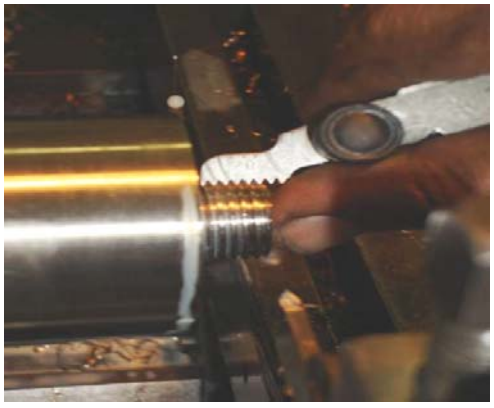

Figura 3.15 Detalhe da confecção da rosca da ponta cônica

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

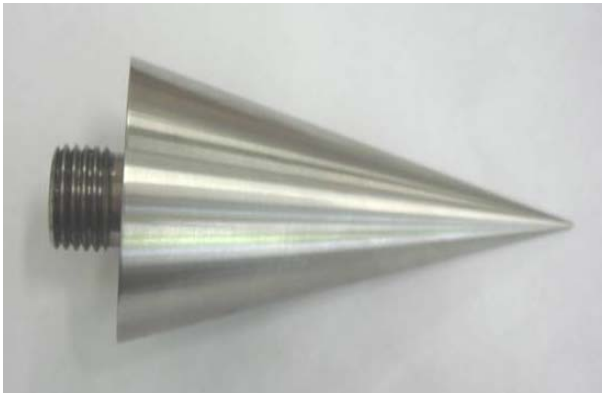

Figura 3.16 Detalhe da rosca e da ponta cônica

3.4.2. Portas de Drenagem

A fim de minimizar o potencial de entupimento das drenagens durante a cravação da sonda foram projetadas portas constituídas de cilindros rosqueados contendo em seu interior uma malha com abertura equivalente a peneira #40.

Estas portas têm comprimento 3 mm e diâmetro de 4 mm, e em seu interior foi estampada uma peneira com malha #40, conforme pode ser vista nas Figuras 3.17, 3.18 e 3.19.

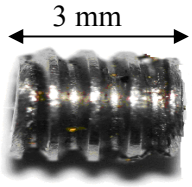

Figura 3.17 Detalhe da porta de drenagem de Ø 4x3 mm

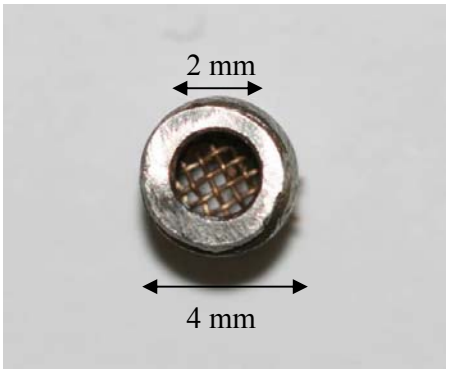

Figura 3.18 Detalhe da porta de drenagem de Ø4x3 mm contendo a malha no interior.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

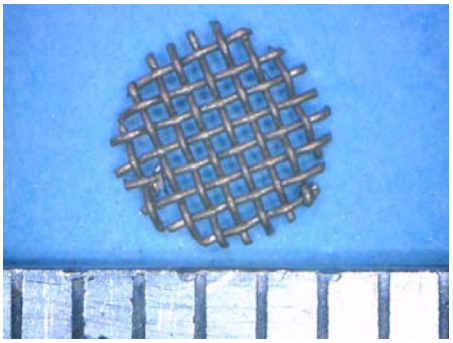

Figura 3.19 Detalhe da malha de 0.425 x 0.425 mm .

A abertura de malha é condicionada ao tipo de solo a ser ensaiado para minimizar a perda de carga. No caso de solos finos, as portas de drenagem podem ser facilmente retiradas e colocadas novas portas com abertura de malha compatível com o diâmetro das partículas destes solos.

3.4.3. Base do Permeâmetro

A base do permeâmetro consiste de um cilindro no qual a placa porosa utilizada para homogeneizar a injeção radial é apoiada e onde as tubulações de drenagem e os cabos do transdutor são levados à superfície.

A base é afixada ao conjunto por intermédio de dois parafusos de aço 316 (vide Figura 3.20). Na base ainda estão instaladas três conexões de aço 316, vistas na Figura 3.21, destinadas à saturação das linhas de drenagem e imposição do fluxo. A disposição das linhas de drenagem está ilustrada na Figura 3.22.

A base é rosqueada, vide Figura 3.22, para permitir o seu acoplamento a uma luva que foi confeccionado no Instituto Tecnológico (ITUC) como é apresentado na Figura 3.23, que por sua vez, conduz o conjunto as hastes de cravação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

Figura 3.20 Detalhe dos parafusos empregados para as entradas de água

Figura 3.21 Detalhe do torneamento dos furos para a localização dos parafusos.

Figura 3.22 Detalhe dos furos para a localização dos parafusos e canais de água.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

Figura 3.23 Detalhe da luva confeccionada.

3.4.4. Placas Porosas

As placas porosas são confeccionadas a partir de chapas de um fluorpolímero denominado Viton. Estas placas porosas estão localizadas nas posições 5, 7 e 9 conforme pode ser visto na Figura 3.5. As placa na posição 5 e 9 possuem uma largura de 2 mm e 17,5 mm de diâmetro. A placa porosa em forma de disco se encontra na posição 7, a mesma apresenta um diâmetro interno de 52 mm e diâmetro externo 54 mm. Esta tem a função de homogeneizar o fluxo imposto pela bomba de seringa e a sua vez impõe um fluxo radial. A Figura 3.24 ilustra as placas empregadas no permeâmetro, enquanto que a Figura 3.25 e 3.26 apresentam a sua localização.

Figura 3.24 Detalhes dos diâmetros das placas porosas localizadas nas posições 1,2,3.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

É necessário ressaltar que as pedras porosas se encontram fixadas nas extremidades localizadas nas posições 5 e 9 encaixando perfeitamente nos lados do transdutor como se pode ver na Figuras 3.25, 3.26 e 3.27.

Figura 3.25 Detalhes da localização da pedra porosa na posição 1

Figura 3.26 Detalhes da localização da pedra porosa na posição 2

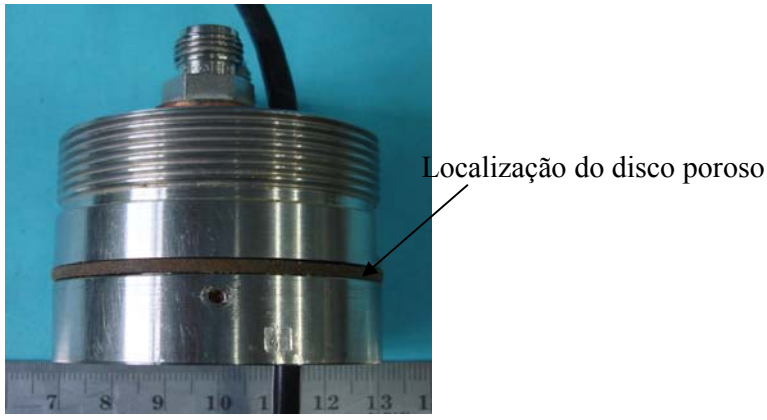

Figura 3.27 Detalhes da localização do disco poroso na posição 7 segunda a localização mostrada na Figura 3.5.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

3.5.
Dispositivos de medição empregados

3.5.1.
Sensor de Pressão

Para a medição da pressão induzida pelo fluxo optou-se pelo uso de um transdutor diferencial de pressão da marca KELLER, modelo PD -10L, com faixa de trabalho de 10kPa. O transdutor visto nas Figuras 3.28 e 3.29, possui um diâmetro externo de 19mm e comprimento de 26mm.

Figura 3.28 Transductor serie PD -10L , KELLER

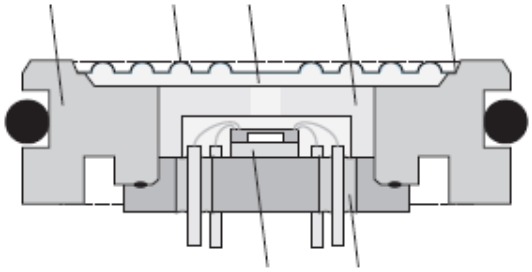

Figura 3.29 Sistema interno do transdutor da serie PD-10L, KELLER

O transdutor apresenta uma alta sensibilidade (*i.e.,* 4 mA)**.** A sua piezo resistividade é alcançada por um chip de silício, que é empregado para a detecção das variações de pressão. O chip é protegido contra a influência do ambiente através de sua instalação em uma câmara selada, mostrada na figura 3.29. A câmara é preenchida com óleo de silicone, de modo a assegurar a transferência de pressão do diafragma para o componente do sensor.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

3.5.1.1.
Cabos elétricos e convenção de cores

Os fios elétricos que transmitem os sinais do transdutor ao equipamento de aquisição de dados na superfície estão em um cabo que passa por dentro das hastes do equipamento. Na sonda foi usado um cabo com 4 vias a qual é conectada a um cabo #412.074.

A convenção de cores dos fios adotada para a montagem, vista na Figura 3.30. As Figuras 3.31 e 3.32 apresentam o conjunto já montado.

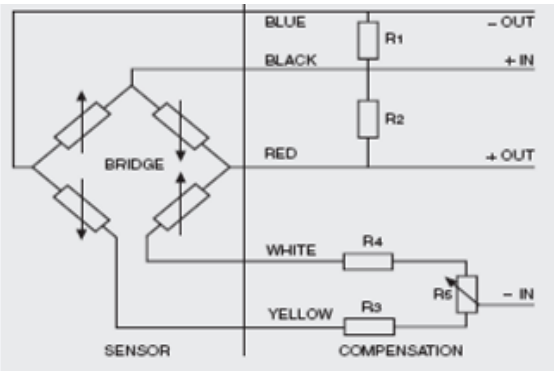

Figura 3.30 convenção de cores da montagem do transdutor diferencial (KELLER)

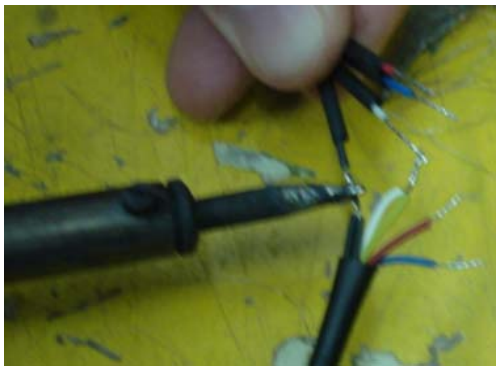

Figura 3.31 Cabos elétricos sendo conectados aos fios do transdutor

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

Figura 3.32 Exemplo ilustrativo dos cabos elétricos já conectados.

3.5.2.
Calibração do transdutor Diferencial

Para a execução dos ensaios com o Permeâmetro foi necessária a checagem do dispositivo de medição de pressões antes de ser usado nos ensaios realizados. A Figura 3.33 apresenta os materiais que foram utilizados para a realização da calibração do transdutor diferencial.

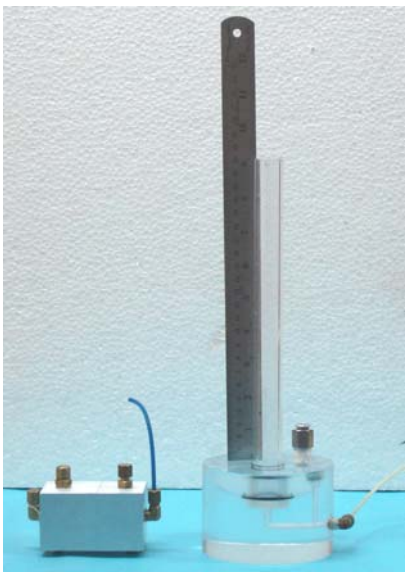

Figura 3.33 Instrumentos utilizados para a calibração

O método de calibração consistiu na aplicação de uma pressão através de coluna de água, conforme pode ser visto na Figura 3.33. A calibração foi realizada através do incremento e redução da coluna d'água. Para avaliar a repetibilidade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

das leituras o procedimento foi realizado em 6 séries de carga/descarga. A Figura 3.34 apresenta os resultados da calibração.

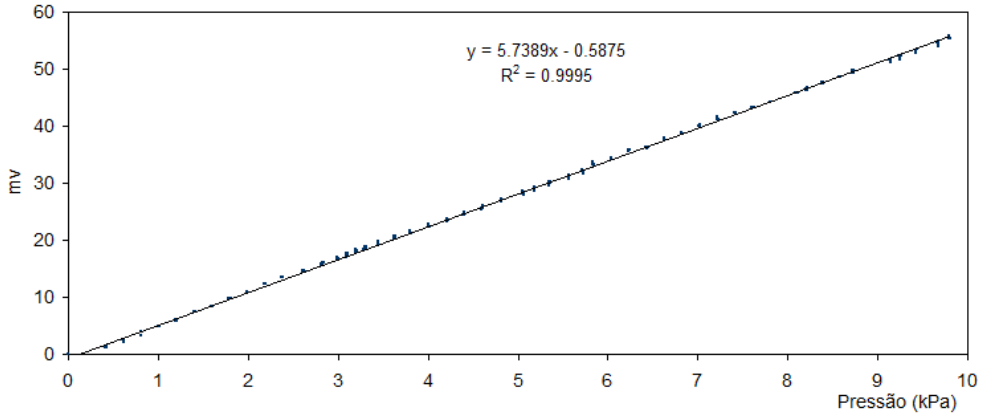

Figura 3.34 Resultados da calibração do transdutor de pressão PD10L, efetuado no laboratório PUC.

Com base nos resultados da calibração foi possível determinar a resolução, a não linearidade, a não repetibilidade, a histerese e a precisão das leituras do transdutor diferencial de pressão. A partir destes parâmetros foi possível determinar a exatidão do transdutor. Estes dados estão disponíveis na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros de calibração do transdutor diferencial de pressão

Parâmetro	Valor
resolução	0,9995 mV/kPa
não linearidade	0.0021 kPa
não repetibilidade	0,0002 kPa
histerese	0,039 kPa
precisão	0,07922 kPa
exatidão	0,04 kPa

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

3.5.3.
Bomba de injeção

O sistema de aplicação de vazão constante é constituído basicamente por uma bomba de fluxo do tipo seringa da série P-74900-40, comercializada pela Cole-Parmer Inc. uma fotografia da bomba é apresentada na Figura 3.35.

A bomba é composta por um motor elétrico, o mesmo que desloca um atuador, que por sua vez empurra o embolo da seringa a uma velocidade constante. A velocidade pode ser ajustada diretamente, através de um painel de controle localizado na fronte da bomba, permitindo assim a mudança de velocidade sem necessidade de suspender o fluxo. Possui também uma ampla faixa de velocidades que varia de 0,008 μL/min até 147 cm^3/min. O volume injetado ou extraído pode ser controlado tanto pela velocidade de injeção, quanto pelo diâmetro da seringa utilizada.

Esta bomba possui uma seringa que foi confeccionada em duro-alumínio por Carillo (2000). O seu embolo possui um diâmetro interno de 17mm podendo deslocar um volume de 12 ml.

Figura 3.33 Bomba de injeção utilizada.

Visando obter uma melhor quantificação do volume de fluido injetado, e aferir os valores acusados no visor da bomba, adicionou-se um medidor de deslocamento (LSCT), para registrar o deslocamento do atuador, que ao multiplicá-lo pela área da seção transversal da seringa obtém-se o volume injetado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

3.5.4.
Calibração do Transdutor de Deslocamento

O transdutor de deslocamento empregado para a medição da vazão da bomba é do tipo LSCT da marca Full Bridge, modelo HS50. Este foi calibrado através do emprego de um micrômetro da marca Schaevitz com resolução de 0,001 mm. O conjunto de calibração está ilustrado na Figura 3.36. A Figura 3.37 apresenta os resultados da calibração.

Figura 3.36 montagem do parafuso micrométrico, transdutor de deslocamento e Data Logger.

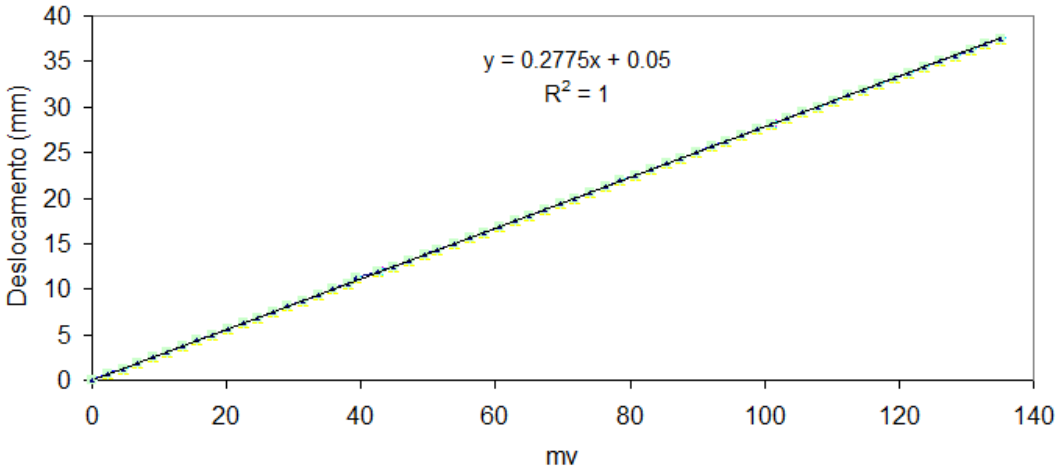

Figura 3.37 Curva de Calibração do LSCT

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

Com base nos resultados da calibração foi possível determinar a resolução, a não linearidade, a não repetibilidade, a histerese e a precisão das leituras do transdutor diferencial de pressão. A partir destes parâmetros foi possível determinar a exatidão do transdutor. Estes dados estão disponíveis na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros de calibração do transdutor diferencial de pressão

Parâmetro	Valor
resolução	1 mV/mm
não linearidade	0,0024 mm
não repetibilidade	0,00018 mm
histerese	0,04 mm
precisão	0,0012 mm
exatidão	0,00378 mm

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621515/CA

3.6. Aquisição de sinais

A aquisição dos sinais dos transdutores de pressão e deslocamento é realizada através de um sistema da marca AHLBORN de modelo ALMEMO, visto na Figura 3.38.

Figura 3.38 Data Logger ALMEMO.