

7

Desenvolvimento de Equipamento Triaxial Não Saturado

O presente capítulo apresenta o desenvolvimento do equipamento triaxial para ensaios na condição não saturada, confeccionado na Oficina do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

Trata-se de um equipamento Triaxial servo controlado, parcialmente automatizado, que possibilita tanto a execução de ensaios com tensão, quanto com deformação controlada. Podendo ainda se trabalhar na condição saturada ou não saturada. Para este último caso está equipado com um sistema de controle de sucção e medição de variação de volume total. O conjunto de controle e aquisição de dados utilizados foi desenvolvido na *Imperial College*. Este equipamento foi projetado para trabalhar com amostras de quatro por oito polegadas com medição de deformação axial interna e com medição do módulo inicial utilizando *Bender Elements*.

Basicamente podemos dividir a equipamento em três partes que seriam a parte de aquisição de dados e comando a segunda o sistema de aplicação de pressões e a terceira fechando o ciclo a instrumentação, que aferi as ações realizadas e fornece subsidio a novos comandos. Na Figura 7.1 abaixo segue uma representação do ciclo de controle do equipamento.

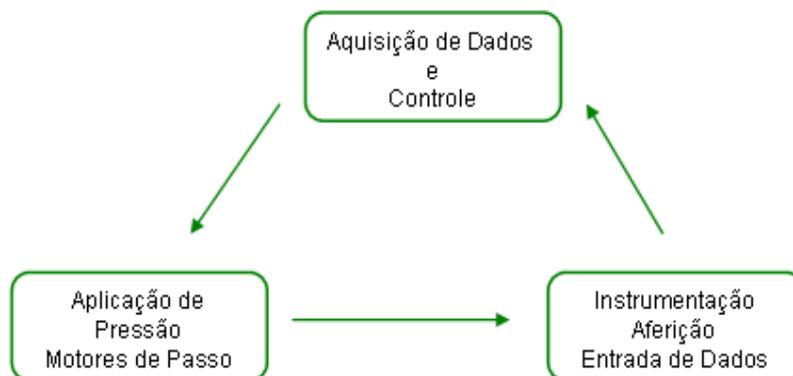


Figura 7.1 – Ciclo de Controle.

Na seqüência esta representada, de maneira esquemática, o equipamento desenvolvido. A descrição dos componentes será o objeto dos itens seguintes deste capítulo.

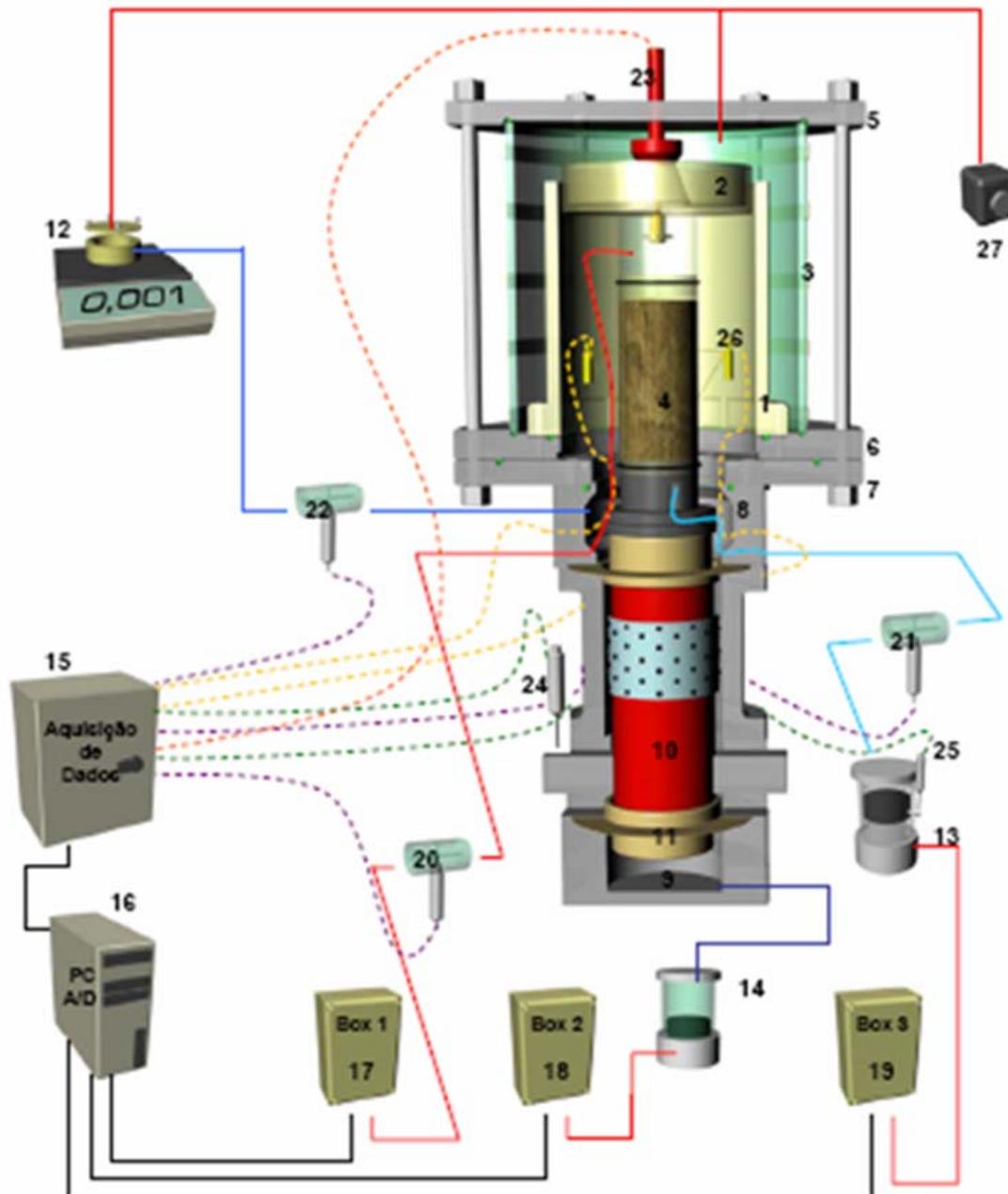


Figura 7.2 – Equipamento Triaxial Não Saturado.

Quadro 7.1 – Convenção das Linhas.

	Cabo de Dados
	Linha de Ar Comprimido
	Linha de Água Pressurizada Corpo de Prova
	Linha de Água Pressurizada Tensão Desviadora
	Linha de Água Pressurizada Tensão Confinante
	Cabo Transdutores de Pressão
	Cabo Transdutores de Descolamento (L&CDT)
	Cabo Eletrônicos
	Cabo Célula de Carga

Legenda:

1. Câmara Dupla em Nylon.
2. Top em PVC.
3. Câmara externa em acrílico reforçada.
4. Conjunto: Top Cap + Base com PCAEA + “Solo”.
5. Tampa da Câmara Triaxial.
6. Base Superior da Câmara.
7. Base Inferior da Câmara.
8. Base da Prensa Conexões.
9. Reservatório de Aplicação de Tensão Axial.
10. Pistão da Prensa.
11. Borracha de vedação da Bellofram.
12. Sistema de Medição de Variação de Volume Total do Corpo de Prova.
13. Sistema de Medição de Variação de Volume de Água Aplicada ao Corpo de Prova.
14. Interface Ar/Água
15. Aquisição de Dados.
16. Computador para Tratamento dos Dados e Comando.
17. Box 1 – Responsável pela Aplicação de Ar no Topo da Amostra.
18. Box 2 – Responsável pela tensão desviadora.
19. Box 3 – Responsável pela Aplicação de Água no Corpo de Prova.
20. Transdutor de pressão – Afere a Pressão de Ar Aplicada no Topo da Amostra.

21. Transdutor de pressão – Afere a Pressão de Água Aplicada no Corpo de Prova.
22. Transdutor de pressão – Afere a Tensão Confinante.
23. Célula de carga.
24. LSCDT – Medidor de Deformação Axial.
25. LSCDT – Sensor do Sistema de Medição de Variação de Volume de Água Aplicada na Amostra.
26. Eletrônicos - Medição de Deformação Axial Interno.
27. Válvula Reguladora de Pressão – Responsável Pela Aplicação da Tensão Confinante.

7.1. Descrição do Equipamento

A apresentação do equipamento será dividida em partes, para um melhor entendimento. Serão apresentados inicialmente os componentes mecânicos da prensa triaxial, correspondentes aos itens 1 ao 11 da legenda. Em seguida será descrito o sistema de medição de variação de volume desenvolvido.

A Figura a seguir mostra o referido equipamento.



Figura 7.3 – Visão Geral do Equipamento Triaxial para Ensaios Não Saturados.

7.1.1. Câmara Triaxial

Como em ensaios triaxiais não saturados a medição da variação de volume total do corpo de provas é realizada através da variação de volume da água confinante, a rigidez da célula triaxial é muito importante. Para tanto na tentativa de suprimir a dilatação, facilmente constatada em sistemas que se utilizam de câmaras simples, foi introduzido o conceito da câmara dupla.

A técnica da câmara dupla consiste em se utilizar duas câmaras como mostrado na Figura 7.4, onde através da pressurização da célula exterior à mesma pressão que a célula interna, pode-se de maneira eficaz considerar a parede da câmara interna infinitamente rígida. Solucionando assim o efeito da dilatação e possibilitando uma medição de variação de volume de maneira mais eficiente.

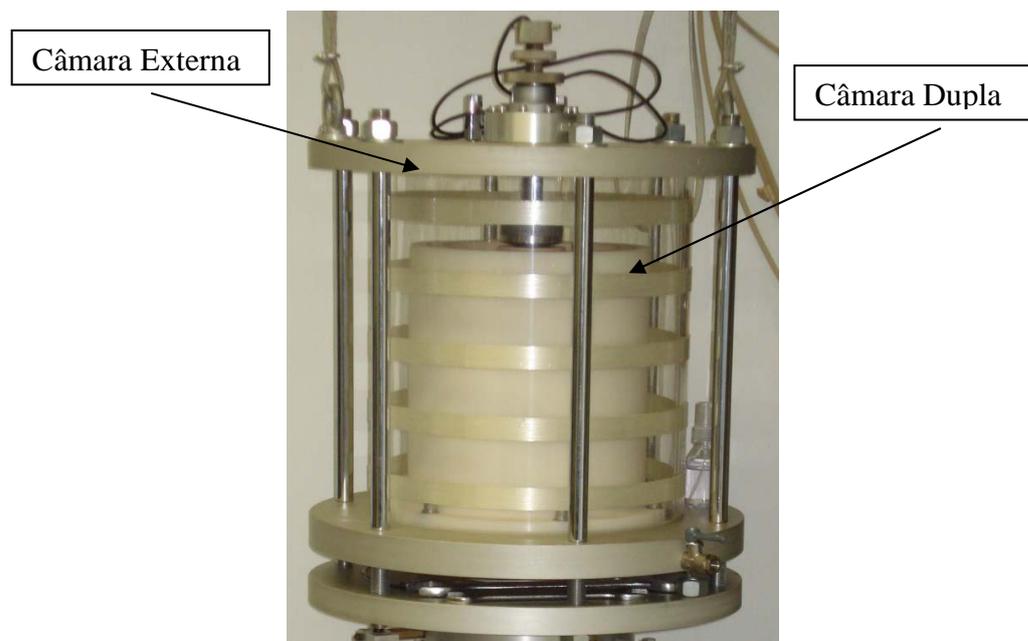


Figura 7.4 – Detalhe Câmara Dupla.

A câmara dupla utilizada no equipamento desenvolvido foi gerada a partir de um tarugo de nylon o qual foi usinado na oficina do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. A escolha do material foi realizada levando em consideração as propriedades mecânicas, peso e custo.

Em conjunto com a câmara dupla foi utilizada uma câmara externa em acrílico [3], a qual foi reforçada utilizando-se uma fita da 3M. Esta fita adesiva é

reforçada com filamentos de poliéster que fornecem alta tensão de ruptura, alta resistência ao impacto e alta resistência ao corte. O filme de poliéster proporciona excelente resistência à abrasão, umidade e desgaste.

Para o fechamento da célula triaxial foram confeccionadas 3 peças em duralumínio naval liga 5052F, itens 5, 6 e 7.

Na tampa da prensa triaxial [5] foram realizados dois furos com posterior instalação de conexões para a instalação de um ponto onde será aplicada a pressão de ar que irá conferir a tensão confinante e mais um ponto sobressalente. Tanto a base superior quanto a inferior foram totalmente produzidas e projetadas na presente dissertação. Os projetos encontram-se em anexo.

Este conjunto de peças [5, 6 e 7] em duralumínio possuem canaletas projetadas para receber anéis o-rings os quais a partir da aplicação de tensão proveniente do aperto das porcas dos tirantes laterais conferem a vedação do conjunto. No total foram utilizados cinco anéis o-rings sendo que quatro destes são responsáveis pela vedação da câmara triaxial com o exterior e o restante realiza a vedação da câmara dupla. Os anéis o-rings podem ser vistos na fig 7.2 representados pela cor verde.

Para a adequação da prensa preexistente a nova câmara triaxial desenvolvida, foi necessária a adaptação da peça [8]. Esta peça é de suma importância para o entendimento do funcionamento do equipamento, pois é por ela que foram realizadas as entradas das tubulações até o interior da câmara triaxial. Foram realizados um total de 8 acessos, cuja finalidade estão dispostas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Relação de Acessos Câmara Triaxial.

Acessos	Finalidade
1	Aplicação de Pressão de ar na topo da amostra
2	Drenagens da base do corpo de prova
2	Instrumentação eletrônicas (medição de deformação interna)
1	Comunicação com o sistema de medição da variação volumétrica total
2	Acessos sobressalentes para futuras instrumentações (Bender Element)

A Figura 7.5 ilustra dois acessos descritos acima bem como o conjunto de vedação desenvolvido para o equipamento.

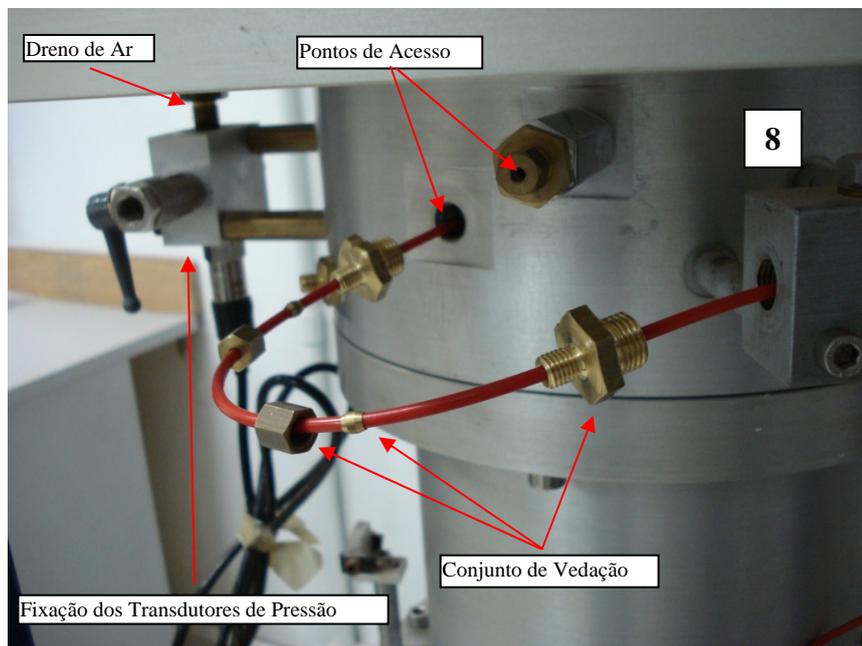


Figura 7.5 – Acesso de tubulações a Câmara Triaxial.

A vedação é conferida por um conjunto de porca e anilha em latão. A passagem do tubo pela peça em latão permite com que a tubulação entre no equipamento sem que ocorram vazamentos.

Fechando os componentes da câmara triaxial vem o conjunto [4] formando pelo top cap em acrílico e a base onde o corpo de prova será disposto. A Figura 7.7 representa estas peças. Na parte superior estão dispostos o *top cap*, o engate da para a célula de carga e a pedra porosa. O *top cap* foi projetado para na sua parte superior receber uma peça em latão no formato de cruz que quando rotacionada em seu eixo permite o acoplamento de célula de carga ao *top cap* e ao corpo de prova. Da lateral do *top cap* indo em direção ao centro foi projetado um canal que irá permitir a aplicação de pressão de ar no topo do corpo de prova.

Na base deste conjunto encontra-se o pedestal sobre no qual esta inserida a pedra cerâmica de alta entrada de ar com capacidade de três Bar. No pedestal, confeccionado em duralumínio, foi desenvolvida uma serie de canais que permitem a aplicação uniforme de pressão de água por sob a pedra cerâmica de

alta entrada de ar. Como indicado na Figura ainda foram projetados dois locais onde serão conectadas as tubulações de drenagem de água.

Fechando assim este conjunto teremos o *top cap* onde aplicaremos pressão de ar e o pedestal onde será aplicada pressão de água, esta configuração permite o controle de sucção, pois por definição a sucção é a diferença entre a pressão de água menos a pressão de ar.

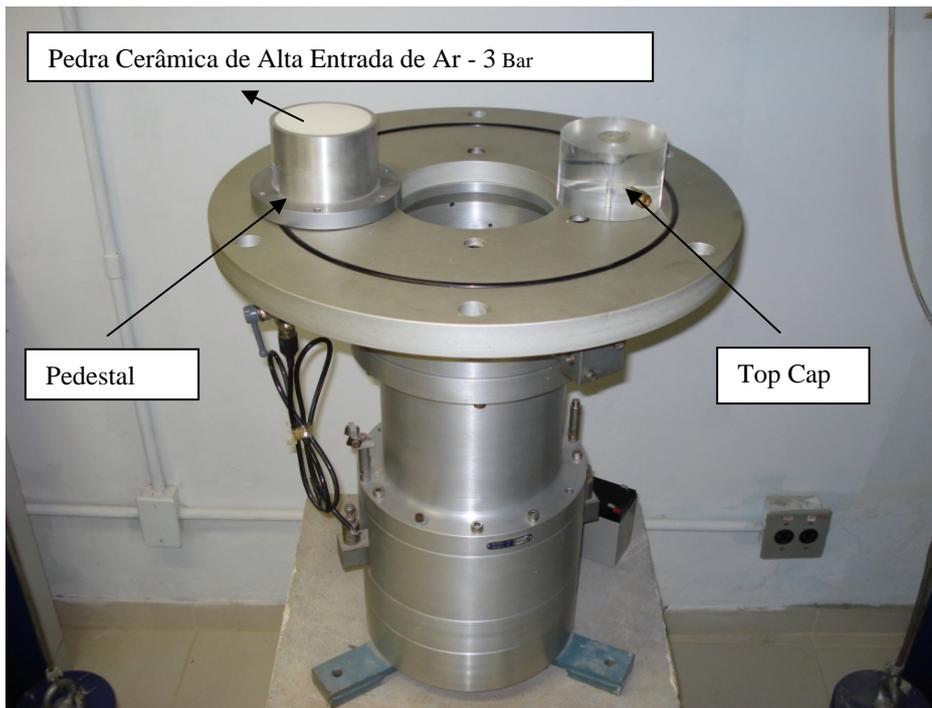


Figura 7.6 – Top cap e pedestal.

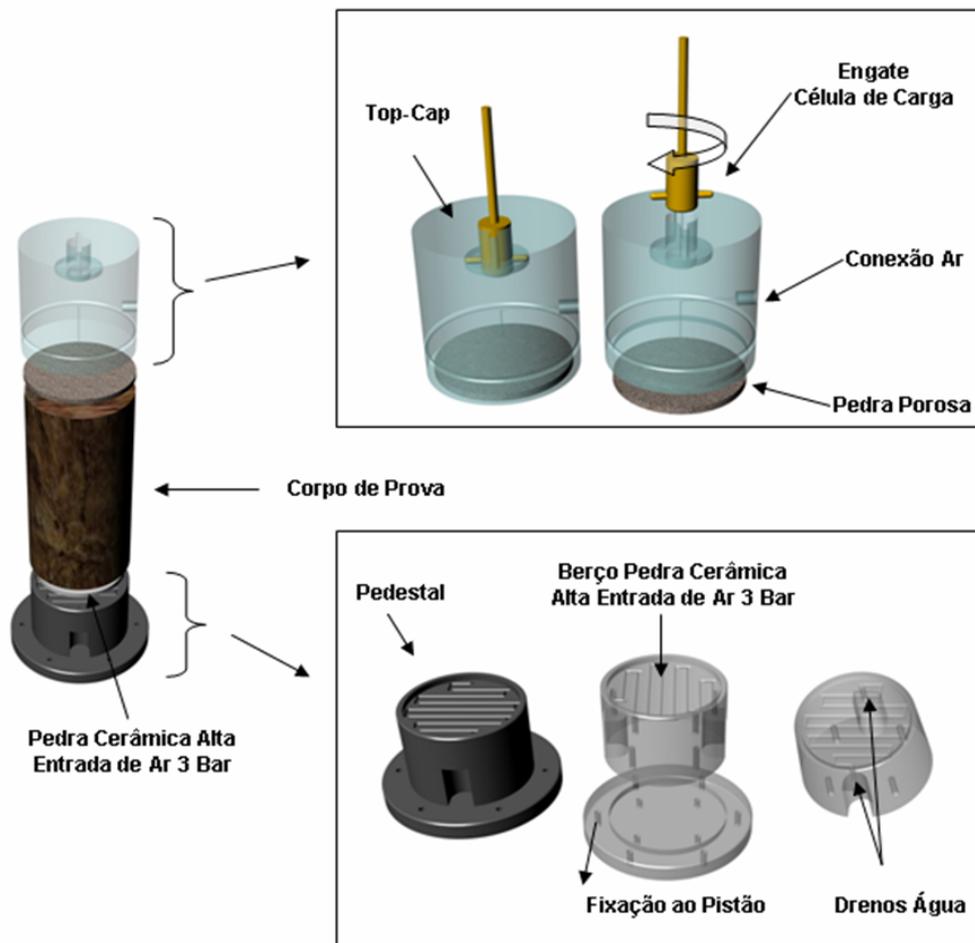


Figura 7.7 – Conjunto Top Cap e Pedestal.

7.1.2. Sistema de Medição de Variação de Volume Total

Nos sistemas triaxiais tradicionais, onde as amostras saturadas são testadas, a medida da variação de volume do corpo de prova é realizada através de um simples monitoramento da água que entra ou que deixa a amostra através de um transdutor de medição de variação volume.

No entanto, em ensaios não saturados as medidas de variação de volume são muito dificultadas em função da compressibilidade do ar. Pois o aumento da pressão de confinamento numa amostra não saturada, fará com que ocorra um movimento de água para fora da amostra sendo que ao mesmo tempo as dimensões do corpo de prova irão mudar devido à compressão do ar contido nos vazios.

Logo, para uma medida eficiente torna-se necessária à mensuração do volume da água que deixa a amostra, bem como a mudança de volume total da

amostra. Com estas duas medidas, pela relação entre a variação de volume devido à água que está sendo expulsa para fora da amostra, é possível determinar a mudança de volume decorrente da compressibilidade do ar.

Para tanto foi desenvolvido um sistema composto por uma balança de precisão e um reservatório em PVC que pode ser observado na Figura 7.9. O funcionamento do sistema esta baseado na hidrostática (princípio de vasos comunicantes) onde através da Lei de Stevin podemos afirmar que quando se tem um único líquido em equilíbrio contido no recipiente:

1. A altura alcançada por esse líquido em equilíbrio, em diversos vasos comunicantes é a mesma. Qualquer que seja a forma de seção do ramo.
2. E para todos os pontos do líquido que estão na mesma altura obtêm-se também a mesma pressão.

Em posse deste principio algumas considerações se tornaram necessárias para o dimensionamento do sistema:

1. O volume de água confinante (V_c) não se altera durante o ensaio.
2. Os volumes que irão sofrer variações serão provenientes da compressão ou expansão do corpo de prova (V_{cp}) e da entrada ou saída do pistão (V_p).
3. A variação de volume de corpo de prova será composta pela saída ou entrada de água na amostra e pela compressão ou expansão do ar contido na amostra.

Desta maneira podemos equacionar a variação de volume proveniente do comportamento mecânico do ar incluso da seguinte maneira:

$$V_t = V_c + V_{cp} + V_p \quad \text{eq. 7.1}$$

Onde V_t corresponde ao volume total do sistema. Em se tratando desta equação analisando em termos de variações simplificamos a parcela do volume confinante a equação fica:

$$\Delta V_t = \Delta V_{cp} + \Delta V_p \quad \text{eq. 7.2}$$

Como o valor da variação de volume proveniente do pistão pode ser facilmente determinado através de uma calibração que levará em consideração a variação de volume total gerada em função do deslocamento proveniente do pistão. Fica faltando à determinação da variação do volume do corpo de prova e

do volume total do sistema. A variação de volume do corpo de prova pode ser descrita pela seguinte equação 7.3.

$$\Delta V_{cp} = \Delta V_{ar} + \Delta V_{\acute{a}gua} \quad \text{eq. 7.3}$$

Onde a medição de variação de volume decorrente da entrada e saída de água do corpo de prova pode ser determinada facilmente com a utilização de um transdutor.

Assim a variação de volume de ar na amostra é expressa pela equação 7.4.

$$\Delta V_{ar} = \Delta V_{cp} - \Delta V_{\acute{a}gua} \quad \text{eq. 7.4}$$

Desta forma a medição da variação de volume total torna-se o parâmetro final necessário para se avaliar o comportamento de deformabilidade do solo.

A determinação da variação de volume total da amostra é realizada através da relação quantidade de água que entra ou sai do reservatório disposto sobre a balança de precisão. Esta variação é decorrente das alterações do volume tanto do pistão que se desloca como pelas mudanças nas dimensões do corpo de prova.

Para a confecção do Medidor de Variação de Volume Total (MVVT) foi utilizada uma balança da marca Marte modelo AL500 com três casas decimais, sendo que sua capacidade máxima é de quinhentos gramas. Dentro desta limitação foi desenvolvido o reservatório em PVC. O reservatório possui 350 gramas limitando assim a capacidade de sistema em 150 gramas de água deslocada. Visando amplificar a sensibilidade do sistema foi desenvolvida uma peça em PVC [2] a qual foi presa na parte inferior da célula de carga. A amplificação é alcançada, pois a peça em PVC diminui a área da seção fazendo com que o nível de água confinante se eleve ou baixe mais para comportar a mesma variação de volume. Desta forma a variação do volume de fluido deslocado para o reservatório, disposto sobre a balança de precisão, aumenta.

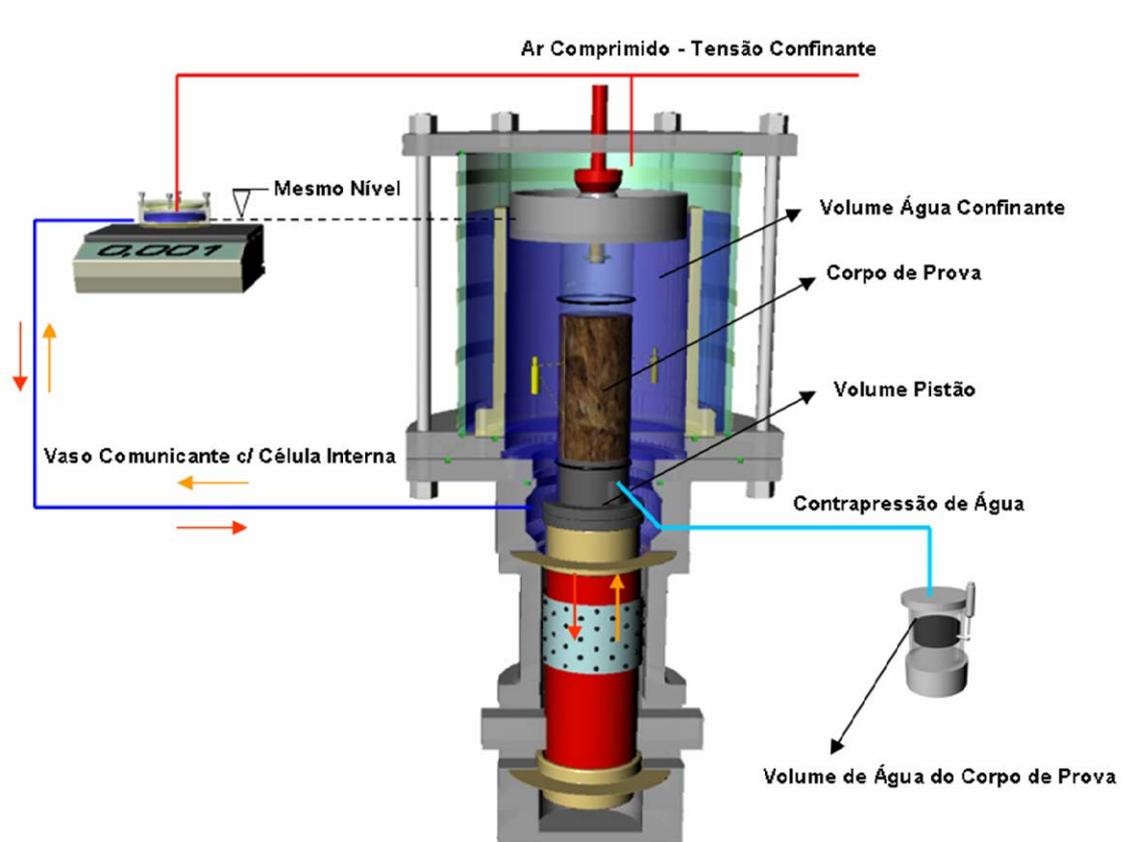


Figura 7.8 – Sistema de Variação de Volume.



Figura 7.9 – Reservatório em PVC.

Uma calibração prévia do sistema foi realizada utilizando-se os materiais mencionados na Tabela 7.2 e dispostos na Figura 7.8. Esta calibração não foi realizada no equipamento triaxial desenvolvido mais sim em uma célula triaxial convencional. Neste teste buscou-se o entendimento do sistema.

Tabela 7.2 – Relação de Materiais Utilizados para Calibração Prévia do MVVT.

Equipamento	Característica / Função
Balança	Precisão de 3 dígitos
Bureta	Precisão de 1/10 ml
Câmara Triaxial	Convencional
Aplicação de Pressão	Reguladores de Ar comprimido
Interface Ar/Água	Pressurização da Bureta
Corpo de Prova	Confeccionado em espuma

O processo de calibração consistiu em aplicar uma pressão de ar (tensão confinante) igual na célula Triaxial e no MVVT, de modo a garantir o princípio de vasos comunicantes. Foi também aplicada uma contra-pressão, que permiti-se o fluxo drenante na amostra.

Houve o monitoramento da variação de volume do corpo de prova através da bureta bem como a variação de volume total via alteração da massa do contida no reservatório sobre a balança. Logo, tentou-se correlacionar a variação de massa medida na balança com a variação de volume na bureta.

Os resultados são condicionados à geometria do sistema, visto que a sensibilidade esta diretamente correlacionada com a variação de nível da água disposta no sistema de MVVT.

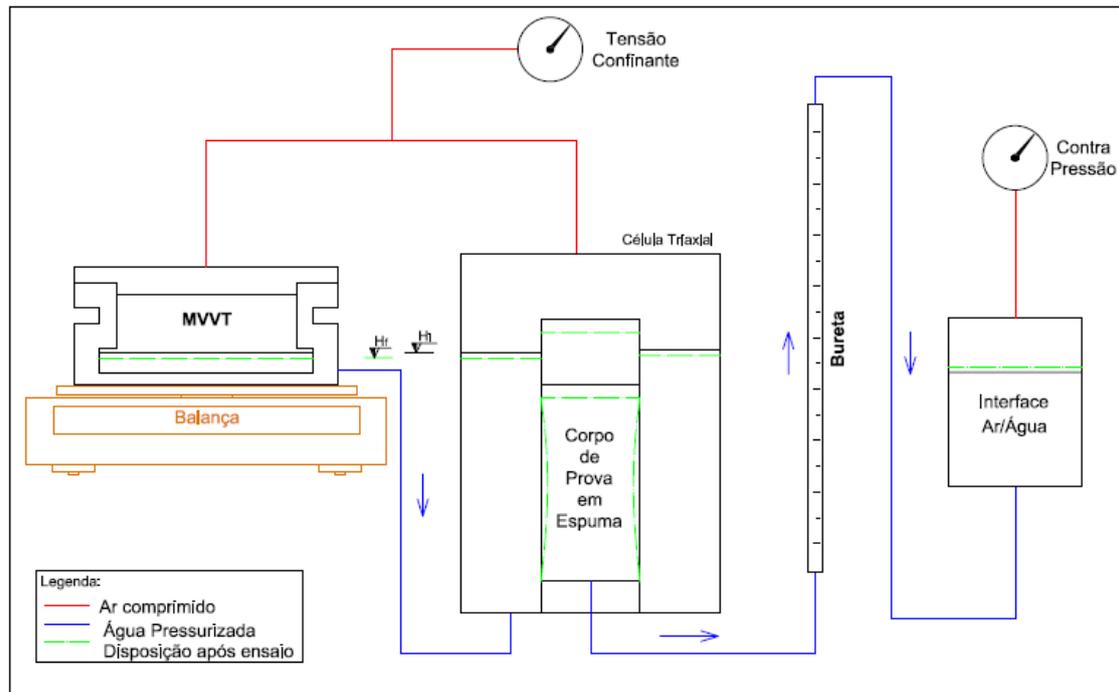


Figura 7.10 – Calibração do Sistema de Medição de Variação de Volume Total.

O gráfico da Figura 7.11 apresenta os resultados obtidos na calibração do MVVT.

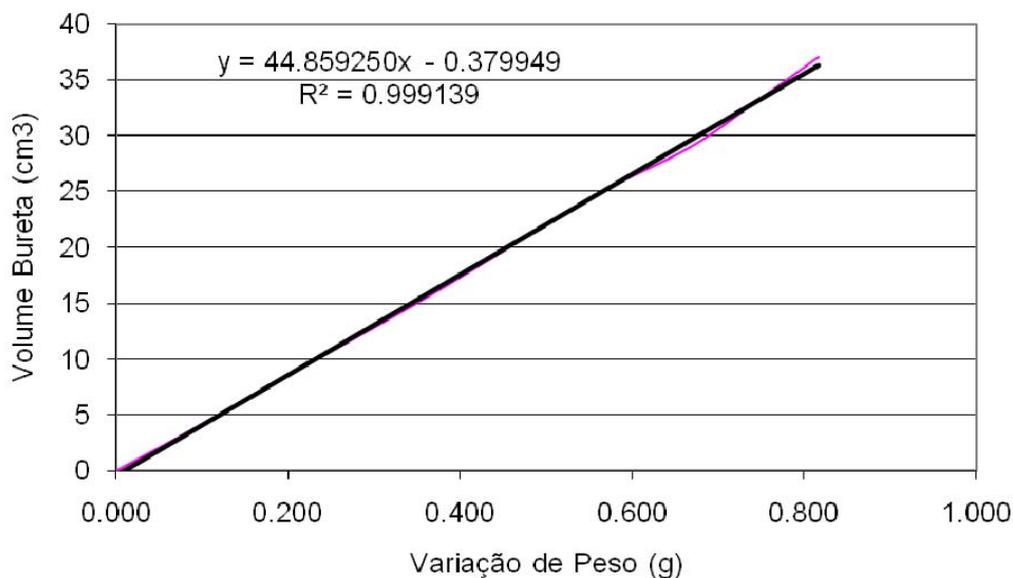


Figura 7.11 – Calibração do Sistema de Medição de Variação de Volume.

7.1.3. Sistema de Aquisição de Dados e Controle

O conjunto de equipamentos responsáveis pela aquisição de dados e controle da prensa triaxial é semelhante ao já descrito no capítulo 4 item 4.2.2.6.

Trata-se do sistema de servo controle desenvolvido pela Imperial College constituído por uma placa de aquisição de dados que realiza a conversão das leituras dos sensores de analógica para digital. Os dados são enviados ao computador via cabo serial RS232 onde através do software Triax5 são processados e transformados em unidade de engenharia utilizando-se de equações de calibração. Os comandos programáveis oriundos do software são enviados aos sistemas de aplicação de pressão através da placa 8255 I/O com interface PCI. Os procedimentos de programação de ensaios estão anexados à presente dissertação.

7.1.4. Sistema de Aplicação de Pressões

As pressões serão aplicadas e controladas pelo sistema apresentado na Figura 7.12. Onde através de um motor de passo, alimentado pela placa de conversão, gira o eixo da válvula de precisão no sentido necessário para que a pressão requerida pelo software seja alcançada.

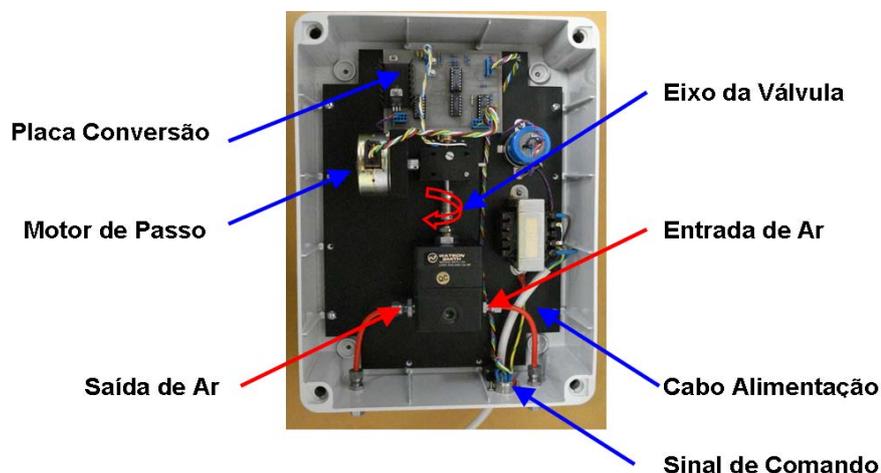


Figura 7.12 – Box (Controlador de Pressão).

O sistema da Imperial College dispõe de três caixas como a acima mostrada que realizaram respectivamente a aplicação da tensão de ar no topo da amostra a contrapressão e a tensão desviadora. Por meio deste sistema que a sucção será controlada.

Entretanto, será necessário o uso de somente uma interface ar/água que irá realizar o cambio entre a pressão de ar proveniente do sistema regulador de pressão em pressão de água na câmara inferior da prensa hidráulica [9].

A aplicação de pressão confinante será dada através da pressurização da célula triaxial como demonstrado na Figura 7.2. Diferentemente dos sistemas de aplicação de pressões acima mencionados este será realizado manualmente utilizando-se uma válvula reguladora de pressão. Esta prática será adotada tendo em vista que durante a execução do ensaio a tensão confinante será constante.

7.1.5. Instrumentação

A instrumentação a ser utilizada no equipamento triaxial será apresentada na seqüência de maneira esquemática referenciada à função em que será empregada.

As respectivas mensurações de poro-pressão, tensão confinante e pressão de ar no topo da amostra serão realizadas através de transdutores de pressão da marca Keller modelo PR-27W / 8763-15 que trabalha na faixa de pressão de 0 a 15 bar. A especificação destes sensores são as mesmas dos já utilizados no Equipamento de Tensão Controlada de Imperial College, o qual foi utilizado na presente dissertação.

A medição do carregamento axial será realizada através de uma célula de carga da Wikeham Ferrance com capacidade de 10 kN.

Para a medição da variação de volume e deslocamentos axiais serão utilizados transdutores de deslocamento tipo LSCDT.

A realização da medição da deformação axial no corpo de prova em pequenas deformações será realizada por um par de eletrônicos tipo Imperial College, os quais foram desenvolvidos no laboratório de Geotecnia e Meio ambiente da PUC-Rio.

De maneira complementar na determinação dos módulos iniciais de deformações, será implementada a instalação do Bender Element. Para tanto, foi encomendada a fabricação de um conjunto de *top cap* e pedestal com as referidas instrumentações.

No sistema de medição de variação de volume total como já mencionado foi utilizada uma balança de precisão da marca marte com precisão de três casas decimais.

Todos os sensores mencionados com exceção da balança digital de precisão serão conectados ao sistema de aquisição de dados mencionado no item anterior. A balança será conectada ao computador através de um cabo RS232.