

3

Programa Experimental

3.1

Considerações Iniciais

O programa de ensaios estabelecido teve como objetivo principal avaliar o comportamento de um solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno, submetido a ensaios triaxiais de extensão. Para tal, foi desenvolvido um programa experimental que se baseia nas duas etapas descritas a seguir:

Na primeira etapa foi realizada a montagem do equipamento triaxial do tipo desenvolvida por Bishop e Wesley (1975). Cabe mencionar que tal equipamento foi confeccionado no próprio Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Tal equipamento é de maiores dimensões que os equipamentos convencionais, permitindo ensaiar amostras de 4 polegadas de diâmetro por 8 polegadas de altura. Após a montagem do equipamento foram feitos dois ensaios de compressão triaxial (um com areia e um com areia-fibra) com a finalidade de comprovar o bom funcionamento do equipamento comparando os resultados obtidos com os resultados de CASAGRANDE (2005), já que na presente pesquisa foi empregada a mesma areia utilizada na pesquisa de CASAGRANDE (2005). A montagem e testes no equipamento levaram aproximadamente 7 meses, os motivos desse tempo serão abordados no decorrer do presente capítulo.

Na segunda etapa foram realizados ensaios triaxiais de extensão com a finalidade de avaliar o comportamento da areia e da mistura areia-fibra submetidas a solicitações de extensão.

As etapas do programa experimental proposto são detalhadamente descritas neste capítulo, bem como a descrição dos materiais utilizados na pesquisa, os métodos utilizados na preparação das amostras, detalhes de execução dos ensaios e equipamento utilizado nos ensaios triaxiais.

Foram realizados 10 ensaios neste programa experimental, (desconsiderando as repetições executadas para uma melhor confiabilidade dos resultados obtidos). Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

3.2

Materiais Utilizados

São apresentadas as informações correspondentes às propriedades dos materiais envolvidos na presente pesquisa.

Os ensaios de caracterização física foram realizados conforme os seguintes métodos e procedimentos:

- Ensaios de granulometria (NBR 7181 - ABNT, 1984-e);
- Massa específica real dos grãos (NBR 6508 - ABNT, 1984-c);
- Índices de vazios, mínimo e máximo (NBR 12051 – ABNT, 1991-b; NBR 12004 – ABNT, 1990).

3.2.1

Areia

A areia é proveniente de uma jazida localizada no município de Osório – RS. Este material caracteriza-se por ser uma areia fina (NBR 6502 – ABNT, 1995; ASTM D 2487, 1993), limpa e de granulometria uniforme que, segundo SPINELLI (1999) e CASAGRANDE (2005), tem o quartzo como material correspondente a 99% da sua composição mineralógica, sendo o restante composto por glauconita, ilmenita, turmalina e magnetita. Não foi observada a presença de matéria orgânica. Este material teve sua curva granulométrica e índices físicos determinados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, conforme apresentados na Figura 3.1 e na Tabela 3.1.

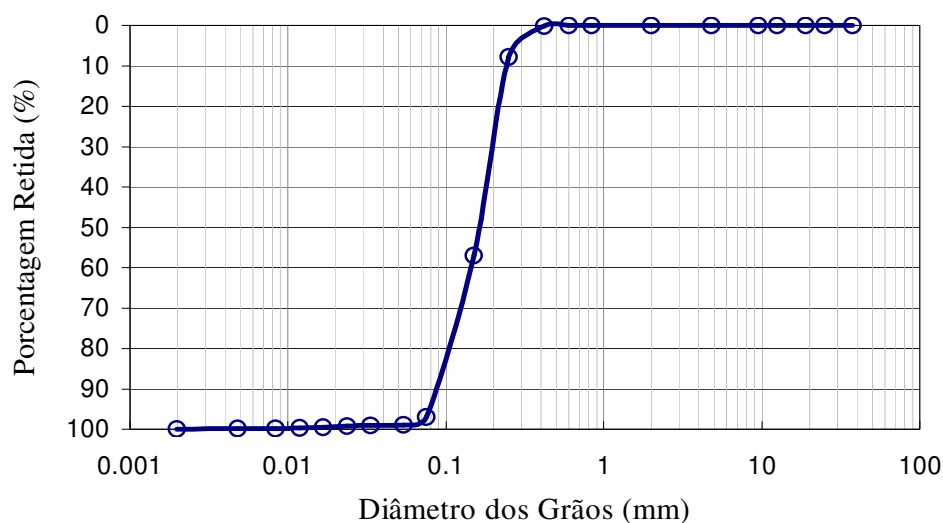


Figura 3.1: Curva granulométrica da areia de Osório (Casagrande, 2005)

Tabela 3.1: Índices físicos da areia de Osório (Casagrande, 2005)

Índices Físicos	Areia de Osório
Densidade real dos grãos (G_s)	2,63
Coeficiente de uniformidade, C_u	2,1
Coeficiente de curvatura, C_c	1,0
Diâmetro efetivo, D_{10}	0,09 mm
Diâmetro médio, D_{50}	0,16 mm
Índice de vazios, emínimo	0,6
Índice de vazios, emáximo	0,9

3.2.2

Fibras

As fibras utilizadas como elemento de reforço foram fibras poliméricas de polipropileno produzidas pela empresa Química Suíza S.A., do Peru. Estas fibras são denominadas “Fibermesh 150”, as quais foram cedidas pela empresa graças ao gerenciamento do Ing. Milan Pejnovic. Cabe mencionar que estas fibras atualmente são utilizadas como um aditivo para o concreto na indústria da construção no Peru. Estas

fibras foram escolhidas por apresentarem características uniformes e bem definidas e por serem inertes quimicamente. O diâmetro das fibras é de 0.03mm.

Na Tabela 3.2 são apresentadas as principais características das fibras utilizadas. A Figura 3.2 mostra o aspecto das fibras de polipropileno empregadas na presente pesquisa.

Tabela 3.2: Resumo das propriedades mecânicas das fibras

Propriedades mecânicas	Fibermesh 150
Massa Específica	0,91 gr/cm ³
Módulo de elasticidade-elongação	80 %
Resistência à tração última	300 MPa
Comprimento	19,3 mm



Figura 3.2: Aspecto das fibras de polipropileno com 19.3 mm de comprimento e 0.03 mm de diâmetro.

3.2.3

Água

Na totalidade dos ensaios foi utilizada a água destilada disponível no laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC–Rio.

3.3

Equipamento Triaxial Desenvolvido

O equipamento utilizado na presente dissertação é um tipo de equipamento similar ao desenvolvido na Imperial College of Science and Technology (London) no ano 1975 por Bishop e Wesley, o qual é um equipamento triaxial hidráulico que permite a realização de uma extensiva gama de ensaios em diferentes trajetórias de tensões. O equipamento consta basicamente de duas partes, a câmara superior similar à de um equipamento triaxial convencional, e a parte inferior que é o elemento característico diferenciado. O sistema de aplicação de carga axial é feito através de uma membrana (Bellofram) situada abaixo do pedestal, que se move para cima ou para baixo fazendo com que a amostra entre em contato com uma célula de carga interna na parte superior da câmara, que por sua vez mede a carga aplicada. Então, a carga axial é aplicada aumentando-se a pressão na interface situada sob o pedestal. Trata-se de um sistema servo controlado, inteiramente automatizado, neste equipamento é possível a realização de ensaios tanto com tensão quanto deformação controlada, podendo ainda se trabalhar na condição saturada ou não saturada. No caso da pesquisa os ensaios foram realizados na condição saturada. Na Figura 3.3 apresenta-se o esquema do equipamento triaxial.

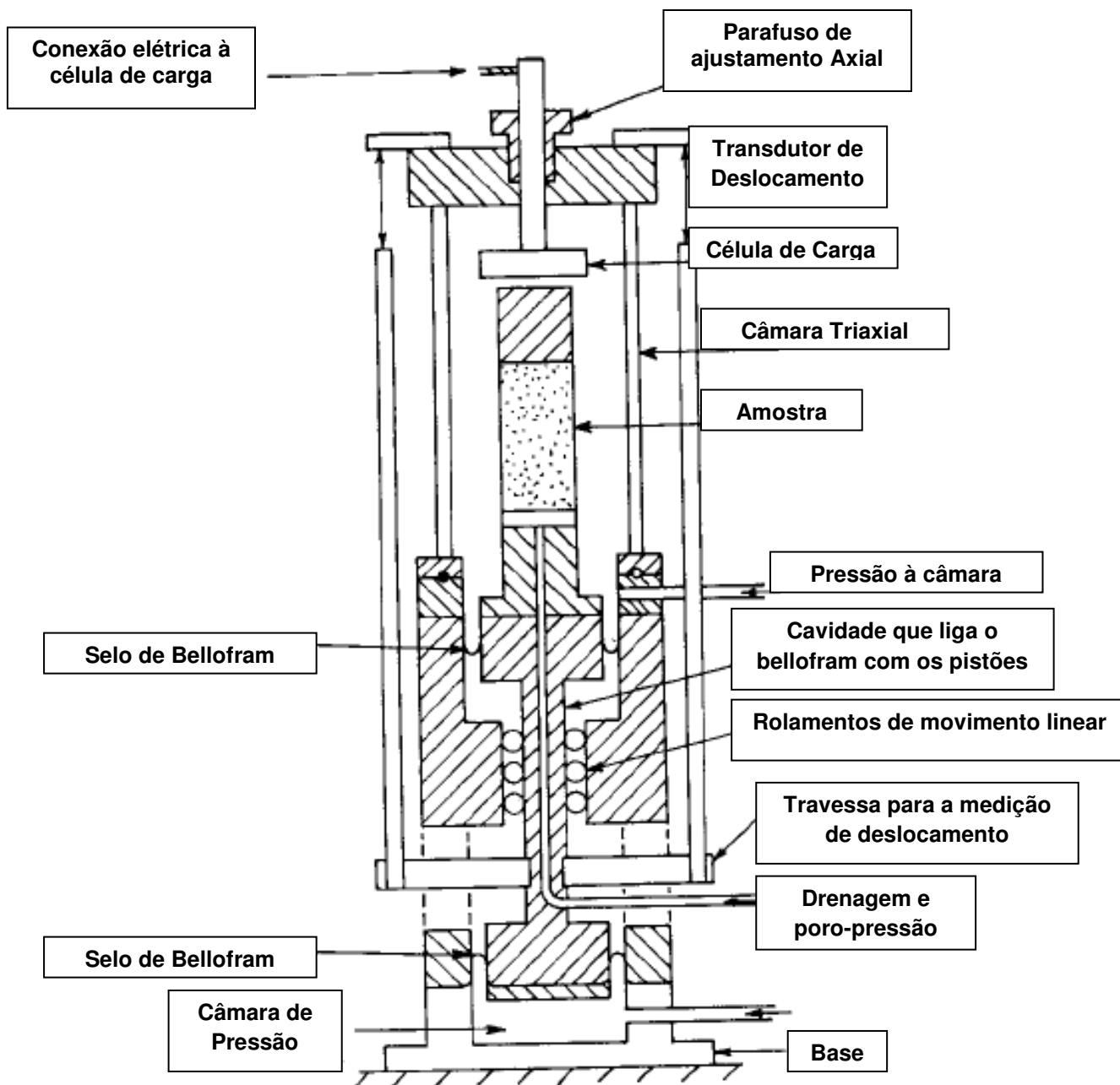


Figura 3.3 – Esquema diagramático do aparelho desenvolvido por Bishop e Wesley (1975).

O conjunto de controle e aquisição de dados utilizados foi desenvolvido no Imperial College of Science, Technology and Medicine, em Londres/UK.

O equipamento está vinculado ao programa TRIAX, desenvolvido pela School of Engineering and Computer Science da Universidade de Durham, este programa permite realizar as seguintes ações:

- O controle da aplicação das pressões tanto na câmara triaxial, como nos sistemas de contrapressão e RAM;
- O controle da velocidade dos ensaios;
- O controle dos caminhos de tensão dos ensaios;
- A aquisição automática de dados;
- O monitoramento do ensaio durante a sua execução.

O tamanho do equipamento permite realizar ensaios com amostras de 4" de diâmetro por 8" de altura, o qual é uma grande vantagem quanto à representatividade dos solos a serem testados.

Durante a montagem do equipamento para a presente pesquisa, surgiram algumas dificuldades que foram superadas, como por exemplo:

- Foram concertadas as conexões das mangueiras para as entradas de ar e água na câmara triaxial, na base e no topo do corpo de prova;
- Foram trocados os o-rings de borracha na base e no topo da câmara triaxial com a finalidade de acabar com os vazamentos gerados pela aplicação das pressões de água e ar aplicadas na câmara;
- Foram trocadas as hastes e a base da câmara triaxial, as novas hastes apresentavam um maior diâmetro que os furos das bases, pelo qual os furos das bases tiveram que ser ampliados;
- Foi fabricado um novo top cap de acrílico, com o centro reforçado com cobre, com a finalidade de oferecer maior resistência quando solicitado a extensão;
- Foi trocada a célula de carga, já que a célula que encontrava-se montada no equipamento estava quebrada;
- Pelo fato que o sistema de aquisição de dados tem um sistema elétrico diferente à da instrumentação utilizada no equipamento, foram elaboradas extensões com a pinagem correta para cada transdutor;
- Foi realizada a conexão a terra do equipamento com a finalidade de acabar com as flutuações na tomada de dados de cada transdutor utilizado. Cabe mencionar que o sistema elétrico da aquisição de dados tem um circuito em série, fato pelo qual, quando um transdutor apresentava problemas de flutuação nos dados registrados, os outros transdutores ficavam instáveis também;

- Todos os transdutores foram calibrados muitas vezes pela presença das flutuações na tomada de dados;
- Foram trocados os transdutores de pressão e contra pressão, várias vezes, já que eles apresentavam problemas de flutuação no registro dos dados;
- O sistema de aquisição de dados foi revisado e concertado, já que ele era o gerador das flutuações nas leituras registradas pelos transdutores.

Todas estas etapas foram superadas em 7 meses, após a montagem do equipamento e a realização dos ensaios de teste do equipamento, iniciou-se a realização dos ensaios com a areia e a mistura areia-fibra.

Na seqüência será abordada a descrição dos elementos que conformam o equipamento triaxial desenvolvido na presente dissertação.

3.3.1

Câmara Triaxial

A câmara utilizada na presente dissertação tem 35 cm de diâmetro e 45 cm de altura com uma capacidade de armazenamento de 43295.07cm^3 , o material empregado para a confecção dessa câmara é acrílico e esta foi reforçada com uma fita adesiva 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 câmara foi empregada uma tampa de duralumínio naval liga 5052F e duas peças de aço na base, as três peças são asseguradas com seis hastes de aço.

Na tampa da prensa tem dois furos, por um deles é aplicada a pressão de ar que confere a tensão confinante.

A base e a tampa da câmara possuem canaletas projetadas para receber anéis o-rings os quais a partir da aplicação de tensão proveniente do aperto das hastes laterais conferem a vedação do conjunto.

No interior da câmara encontra-se a base e o top cap, eles são conectados com o transdutor de contra-pressão. O top cap é uma peça de acrílico, o qual apresenta na parte superior um esquema que vai receber uma peça de aço (engate) 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.

Na base encontra-se o pedestal sobre o qual esta inserida a pedra porosa. No pedestal confeccionado em duralumínio, foi desenvolvida uma serie de canais que permite a aplicação uniforme de pressão de água por sob a pedra porosa.

As Figuras 3.4 (a e b) apresentam em conjunto o pedestal e o top cap do equipamento desenvolvido.

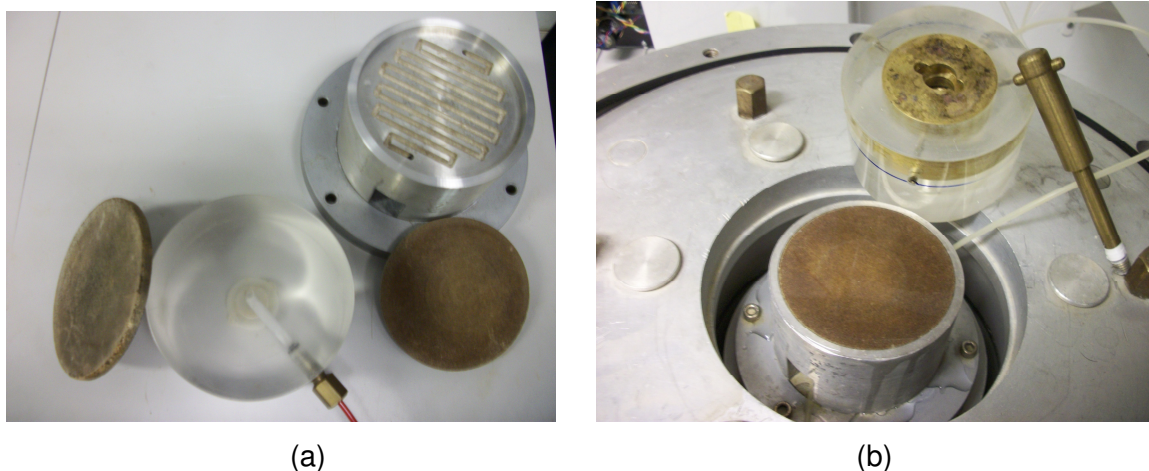


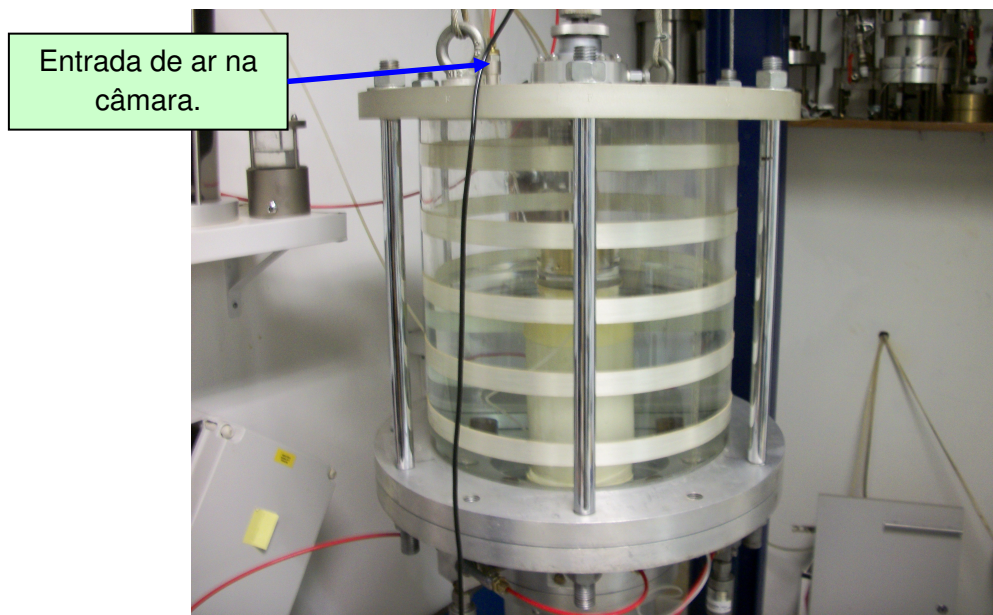
Figura 3.4 – Pedestal e top cap do equipamento desenvolvido. (a) estado inicial das peças. (b) alterações desenvolvidas nas peças.

A vedação é conferida por um conjunto de porca e anilha em latão. A passagem das mangueiras pela peça em latão permite que a mangueira entre no equipamento sem que ocorram vazamentos.

A Figura 3.5 apresenta a câmara triaxial de grandes dimensões empregada nos ensaios realizados.



(a)



(b)

Figura 3.5. (a) Vista geral do equipamento triaxial de maiores dimensões (b) Câmara Triaxial.

3.3.2

Interface Ar/Água

A interface ar/água é a responsável pela conversão de pressão de ar em pressão de água, conferindo a aplicação de tensão confinante, de poro-pressão e auxiliando na transmissão da tensão desviadora. Sua faixa de pressões de trabalho é análoga à da câmara triaxial podendo chegar ao máximo de 1000 KPa, este limite é imposto pelas propriedades mecânicas do acrílico utilizado em seu reservatório. A interface ar/água pode ser observada na Figura 3.6.

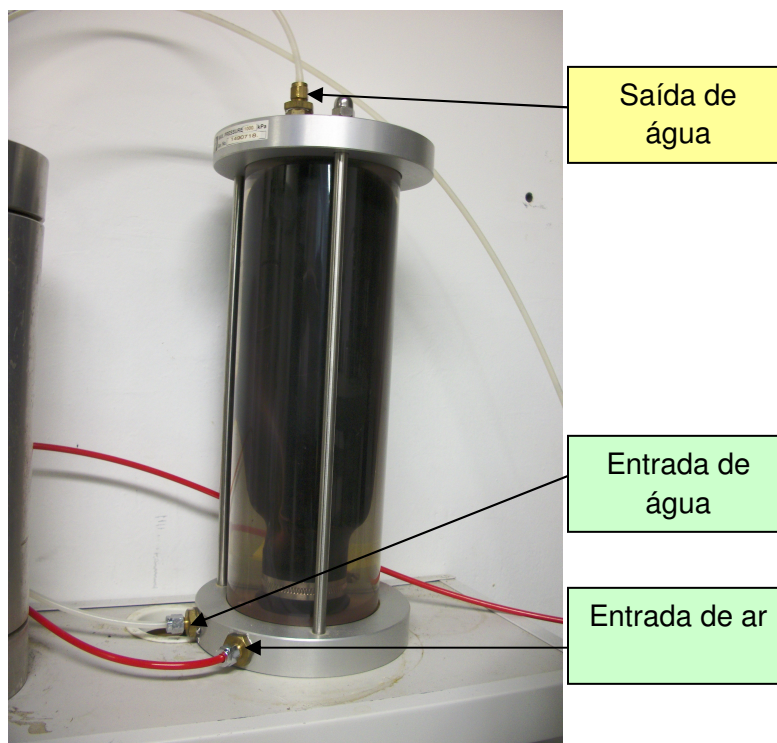


Figura 3.6. Interface ar/água do equipamento.

3.3.3

Sistema de Aquisição de Dados e Controle

Os sinais emitidos pelos transdutores são obtidos por um sistema de aquisição de dados o qual foi desenvolvido no Imperial College. Trata-se de um sistema de servo controle 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 TRIAX 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. O sistema tem dezesseis canais para a

medida de voltagem em corrente contínua. Cinco dos dezesseis canais foram empregados para fazer a medida da voltagem emitida pelos transdutores. Na Figura 3.7 mostra-se o sistema de aquisição de dados empregado.



Figura 3.7. Sistema de aquisição de dados desenvolvido na Imperial College.

3.3.4

Sistema de Aplicação de Pressões

O sistema pelo qual são aplicadas as pressões foi desenvolvido no Imperial College. Este sistema dispõe de três caixas, dentro das quais se encontra uma engrenagem redutor de velocidade que é alimentado por uma placa de conversão, esta engranagem esta acoplada a válvulas reguladoras de pressão, permitindo o controle total do equipamento pelo computador, através do programa TRIAX.

No caso de ensaios de tensão controlada é necessária 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. A Figura 3.8 apresenta as caixas que compõem o sistema de aplicação de pressões.



Figura 3.8. Caixas que regulam as pressões que são aplicadas durante o ensaio.

No caso dos ensaios realizados (deformação controlada), utiliza-se uma bomba de vazão constante de água, mostrada na Figura 3.9, com interface ar/água, para aplicar a pressão na câmara de pressão inferior do equipamento triaxial.

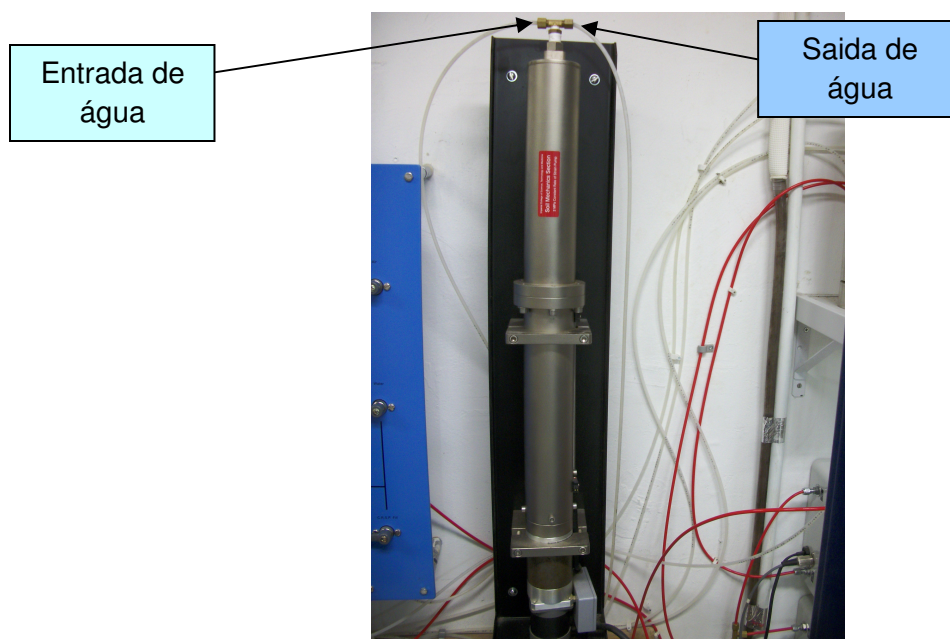


Figura 3.9. Bomba de vazão constante de água.

A pressão confinante é aplicada através da pressurização da câmara triaxial por meio da aplicação de uma pressão de ar, esta pressão de ar é introduzida na câmara através de uma válvula que se encontra no topo da câmara. A aplicação desta pressão confinante foi realizada de maneira manual com a ajuda de um controle o qual era conectado com a caixa correspondente à pressão de confinamento do sistema de aplicação de pressões, essa aplicação das pressões era conferida com o manômetro, tendo em vista que durante a execução dos ensaios tanto a tensão confinante quanto a contra pressão apresentavam flutuações.

3.3.5

Instrumentação

No desenvolvimento do equipamento triaxial foi utilizada a seguinte instrumentação:

- Quanto às medições de pressão confinante e poro-pressão, foram empregados transdutores de pressão da marca Gefran Sensori, modelo TP867 P1.5CM, os transdutores trabalham na faixa de 0 a 150 Psi ou 1034 KPa;
- A medição do carregamento axial é realizada através de uma célula de carga da marca ELE International, modelo STALC3, com número de série 28832, com capacidade de até 10 KN;
- Para a medição do deslocamento foi empregado um transdutor de deslocamento tipo LSC da marca Wikeham Farrance, com número de série HS25/5627;
- A medição da variação de volume foi feita através de um transdutor de deslocamento tipo LSC da marca MPE Transducers Limited, tipo HS.

Todos os transdutores acima mencionados foram conectados ao sistema de aquisição de dados descrito no item anterior. Cabe destacar, quanto às conexões elétricas de todos os transdutores, foram feitas extensões com a finalidade que as conexões sejam compatíveis com as entradas do sistema de aquisição de dados, já que o sistema utilizado, como já foi mencionado com anterioridade, foi desenvolvido no Imperial College, porém as entradas no sistema elétrico são diferentes aos de qualquer fabricante de transdutores.

3.4

Método de Ensaio

A seguir serão apresentados os método de ensaio e procedimentos empregados durante a realização dos ensaios Triaxiais de extensão realizados na pesquisa. Para os ensaios que foram realizados baseando-se em procedimentos propostos em normas técnicas, será feita referência à mesma. No caso de modificação de algum procedimento descrito em norma ou na ausência de norma técnica referente ao assunto abordado, será realizada uma descrição mais detalhada do método adotado.

3.4.1

Preparação das Amostras para Ensaio Triaxiais

As amostras de areia utilizadas nesta pesquisa foram coletadas na cidade de Osório no Rio Grande do Sul, e enviadas para a PUC–Rio, onde foram acondicionadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da Universidade.

A quantidade de fibras adicionadas à areia foi de 0,5% em relação à massa de solo seco da matriz. Os componentes foram adicionados em um recipiente na seguinte sequência: primeiro foram misturadas as fibras (desfiadas manualmente) com o solo seco, posteriormente foi adicionada a água necessária para a mistura atingir 10% de umidade. Esta sequência foi a mais apropriada, pois permitiu a homogeneização dos componentes secos da mistura, antes de ser acrescentada a água. Cada corpo de prova teve uma mistura preparada separadamente. A mistura foi feita manualmente até ser obtida a homogeneização, verificada visualmente. Durante este processo todas as precauções foram tomadas no sentido de se evitar perdas de umidade por evaporação.

Os parâmetros de compactação dos corpos de prova utilizados nos ensaios triaxiais como teores de umidade, peso específico aparente seco e densidades, foram obtidos por CASAGRANDE (2005).

A Figura 3.10 apresenta a visualização da mistura areia-fibra.



Figura 3.10: Mistura da areia com as fibras e a água necessária para atingir 10% de umidade.

3.4.2

Ensaaios Triaxiais de Extensão

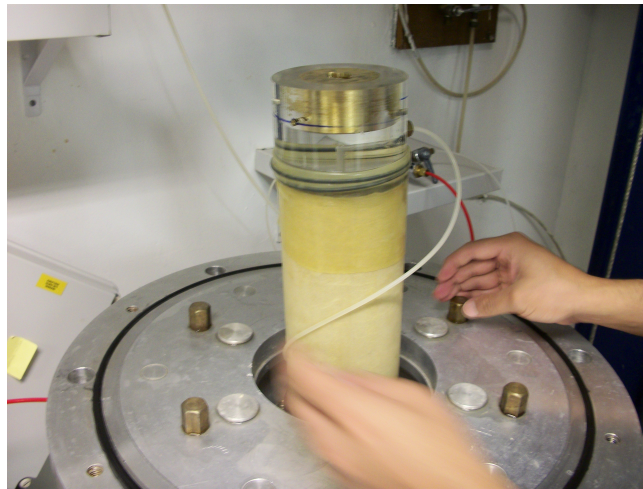
Os procedimentos gerais adotados na preparação e execução dos ensaios triaxiais seguiram os princípios descritos por Bishop e Henkel (1962), Head (1980-a, b e c) e pelos procedimentos de ensaios já consolidados pelo Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

A moldagem dos corpos de prova para os ensaios triaxiais foi realizada no próprio equipamento, em moldes de PVC de 4” de diâmetro por 8” de altura, os quais tem um orifício por onde é aplicada uma sucção com a finalidade de manter a membrana de borracha aderida à parte interna do molde e poder fazer a moldagem do corpo de prova sem problemas. A sucção foi aplicada com ajuda de uma bomba.

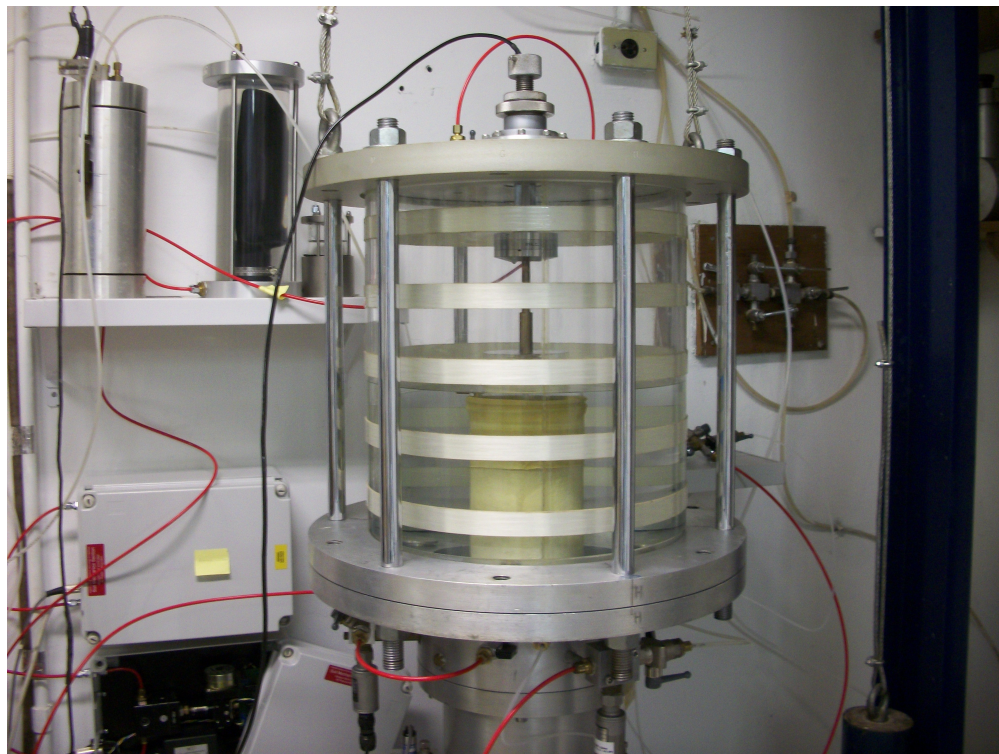
As amostras foram compactadas manualmente em cinco camadas, controlando o peso da mistura adicionada e a altura das camadas de forma de obter a densidade desejada. A Figura 3.11 mostra a visão geral do equipamento triaxial durante a moldagem do corpo de prova.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.11 – (a e b) Moldagem do corpo de prova. (c) Detalhe do equipamento triaxial com a amostra pronta para iniciar o ensaio.

Os critérios adotados para a aceitação dos corpos de prova em relação aos parâmetros de compactação, como peso específico seco e umidade ótima, foram $\pm 2\%$ e $\pm 3\%$ de tolerância, respectivamente. Todos os materiais foram pesados com resolução de 0,01 g.

Após a montagem do corpo de prova na câmara triaxial, iniciava-se a fase de saturação da amostra. O processo de saturação, para assegurar a dissolução completa das bolhas de ar, foi feito em duas fases, as quais levaram um tempo de dois dias aproximadamente, estas duas fases são descritas a seguir:

Pela percolação de água: feita da base para o topo do corpo de prova. Nesta etapa a amostra era submetida a uma tensão confinante efetiva de 10 KPa para impedir o fluxo preferencial entre o corpo de prova e a membrana, a água percolada em cada ensaio foi de 2,5 litros;

Pela aplicação de contra-pressão: estágios de incrementos eram aplicados na tensão confinante e na contra-pressão, sendo a tensão efetiva constante em aproximadamente 10 KPa. A poro-pressão era monitorada na base do corpo de prova e então o processo continuava até chegar-se a um valor médio que dependia da tensão normal aplicada e da trajetória de tensões a ser seguida, este procedimento pode ser feito automaticamente pelo software utilizado ou manualmente, no caso da dissertação a saturação foi feita manualmente para garantir o valor constante da tensão efetiva desejada, pelo fato que os transdutores sempre mantiveram uma flutuação na taxa de 2 KPa.

A garantia da saturação da amostra foi monitorada através da medição do parâmetro B de SKEMPTON (1954) e da variação de volume da amostra, quando a variação de volume atingia valores ao redor de 0.50cm^3 o parâmetro B atingiu valores da ordem de 0,70 a 0,80, medidos antes da fase de adensamento.

A partir daí, aplicava-se a tensão confinante conforme a tensão efetiva média inicial desejada e procedia-se à fase de adensamento da amostra (também controlado manualmente), medindo sempre a variação volumétrica para que fosse possível calcular o índice de vazios após o adensamento. No cálculo da tensão de desvio, foram aplicadas correções de área, seguindo a abordagem proposta por LA ROCHELE et al (1988).

A velocidade de carregamento adotada para a fase de cisalhamento foi determinada em cada ensaio realizado. Já que o valor de t_r obtido na fase de adensamento foi menor

que 120 min em todos os ensaios realizados, a velocidade de cisalhamento foi de 0,025%/min. Todos os ensaios foram drenados pela base e pelo topo.

A fase de cisalhamento foi realizada automaticamente pelo software Triax desenvolvido pela School of Engineering and Computer Science da Universidade de Durham. O procedimento consistiu em a aplicação da pressão isotrópica de adensamento e posteriormente a redução da tensão vertical.

Esta redução da tensão vertical foi efetuada fazendo descer a base do equipamento aplicando um descarregamento na bomba de vazão de água que comanda o movimento da base.