

4 Ensaio Realizados e Metodologias Empregadas

Na presente dissertação foi desenvolvida uma série de ensaios geotécnicos com o intuito de caracterizar as propriedades físicas e o comportamento mecânico de um solo residual de biotita-gnaiss. Para tanto foi desenvolvida uma seqüência de ensaios. Primeiramente foi realizada a caracterização física e mineralógica do material compreendendo a determinação das propriedades índices, microscopia óptica, difração de Raio-X, curva característica de sucção, porosimetria de mercúrio, microscopia digital de varredura e ensaios triaxiais.

4.1. Ensaio de Caracterização

4.1.1. Caracterização Física

Os procedimentos para os ensaios de caracterização foram desenvolvidos segundo as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- NBR 6457/1986 – Amostra de Solos – Preparação de compactação e Caracterização;
- NBR 6457/1986 – Teor de Umidade Natural;
- NBR 6508/1984 – Massa específica Real dos Grãos;
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade;
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica.

A partir dos ensaios de limites de consistência e distribuição granulométrica, foram também determinados, os seguintes índices físicos:

Índice de plasticidade (IP,%), obtido pela diferença entre o limite de liquidez (LL,%) e o limite de plasticidade (LP%); Índice de atividade das argilas (Ia), determinado segundo proposta de Skempton, como:

$$Ia = \frac{IP}{\% < 2\mu m} \quad \text{eq. 4.1}$$

$\% < 2 \mu m$ = fração argila

Classificação segundo a fração argila presente no solo:

- $la < 0,75$ \Rightarrow inativas
- $1,25 > la > 0,75$ \Rightarrow atividade normal
- $la > 1,25$ \Rightarrow ativa

Com as amostras não amolgadas, obteve-se o peso específico dos grãos γ_s , peso específico natural γ_{nat} , peso específico seco γ_d , índice de vazios (e), porosidade (n,%) e grau de saturação (S,%).

4.1.2.

Caracterização Mineralógica

4.1.2.1.

Microscopia Ótica

A microscopia ótica consiste na preparação de lâminas petrográficas, onde as amostras de solo são previamente secas a uma temperatura de 100°C, seguindo-se um processo lento de impregnação com resina epóxi misturada com um corante. A resina ocupa os vazios do solo (poros), e o corante auxilia na identificação destes vazios. Após este procedimento é colada uma lâmina de vidro ao material, e o mesmo é polido até se conseguir uma lâmina com 0,3mm de espessura. Estas lâminas são observadas num microscópio ótico, com aumentos de 48, 96, 144 e 192 vezes. A passagem de luz por essas lâminas identifica o tipo de mineral, o tipo de cimentação e outras características que serão descritas a seguir.

Foi confeccionada 1 lâmina petrográfica para a microscopia ótica. A descrição das feições micro-estruturais do solo estudado na presente dissertação, com base tanto na microscopia ótica, como na microscopia digital, mostrou-se muito importante para a interpretação dos resultados dos ensaios mecânicos apresentados nos próximos capítulos.

4.1.2.2. Difração de Raio-X

A identificação dos argilo-minerais constituintes dos solos é de extrema importância para o entendimento de seu comportamento. Um dos ensaios que auxilia a identificação da composição mineralógica da fração silte/argila é a Difração de Raio-X. Isto é possível porque na maior parte dos sólidos (i.e. cristais), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos Raios-X. Ao incidir um feixe de Raios-X em um cristal, o mesmo interage com os átomos presentes, originando o fenômeno de difração. A difração de Raios-X ocorre segundo a Lei de Bragg a qual estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originam (característicos para cada fase cristalina) conforme a equação 4.2.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \text{eq. 4.2}$$

Onde:

n: Número inteiro

λ : Comprimento de ondas dos Raios-X incidentes

d: Distância interplanar

θ : Ângulo de Difração

Cada argilo-mineral gera um conjunto característico de reflexões segundo ângulos θ , que podem ser convertidos nas distâncias interplanares formadas pelas estruturas cristalinas.

Os difratogramas obtidos para o presente trabalho foram determinados no Laboratório de Difração de Raios-X (LDRX) do Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia (DCMM) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

O equipamento utilizado foi o Difratômetro SIEMENS, modelo D 5000, com dois goniômetros. A interpretação dos resultados é executada por meio do software TOPAS da Bruker AXS. (Figura 4.1).

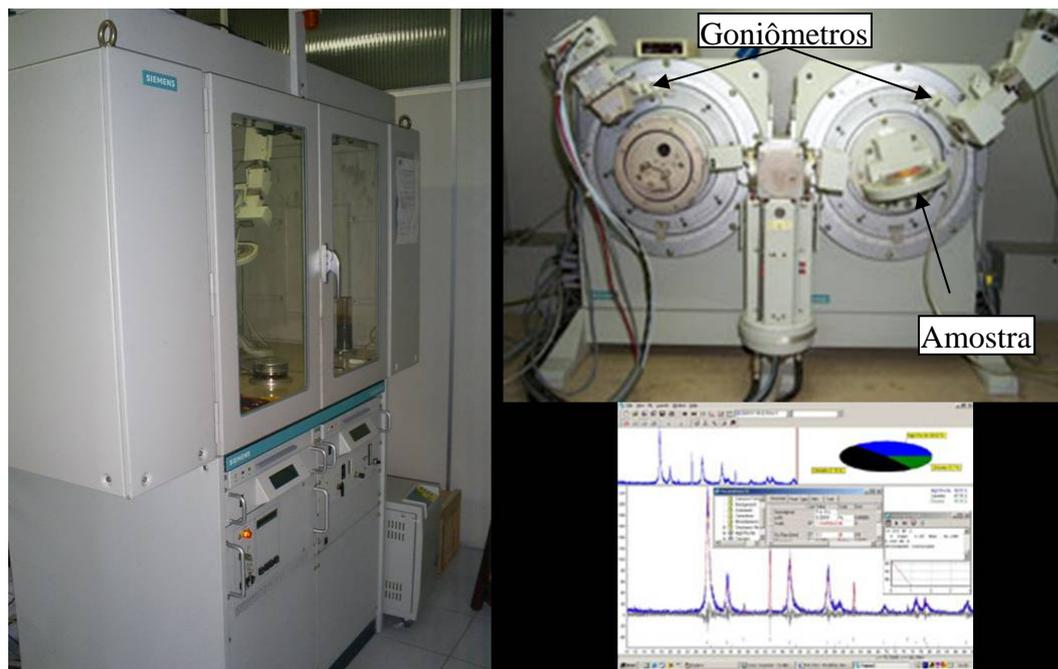


Figura 4.1 – Difrator Siemens D 5000 e Interface do Software TOPAS da Bruker AXS.

4.1.3. Características Não Saturadas

4.1.3.1. Curva de Retenção de Umidade

Um das técnicas empregadas, na presente pesquisa, para a determinação da curva de retenção de umidade foi a do papel-filtro. Este método baseia-se na hipótese de que o papel-filtro alcança equilíbrio termo dinâmico com relação ao fluxo de umidade que decorre em um solo com um valor qualquer de sucção. Quando o papel-filtro é colocado em contato direto com o solo, instaura-se um fluxo d'água do solo para o papel, até que se atinja o equilíbrio. Quando o papel-filtro é posto em contato direto (método de adsorção capilar), mede-se sucção matricial. Em não havendo contacto direto (método de absorção de vapor), mede-se sucção total. O método do papel-filtro mede sucção de maneira indireta, por meio de curvas de calibração. (e.g. Chandler e Gutierrez, 1986).

Os procedimentos adotados seguem o proposto por de Campos et. al. (1992) e Marinho (1994). De maneira resumida o método consistiu em posicionar um disco de papel-filtro contra a amostra de solo em estudo, selando o conjunto para evitar a evaporação. O papel-filtro umedeceu até apresentar o conteúdo d'água

associado à sucção da amostra. A medição da umidade do papel-filtro permitiu a obtenção do valor de sucção procurado, pelo emprego de uma correlação previamente estabelecida (a curva de calibração do papel-filtro).

Para a realização do ensaio foram moldados corpos de prova de solo utilizando anéis de alumínio com diâmetro interno de 4.75 cm por 2 cm de altura. Após a moldagem era determinada a umidade do solo. Com os valores de umidade desejada em cada anel, definidas em função da disposição dos pontos na curva de retenção, as umidades dos anéis eram ajustadas (umedecimento ou secagem). Após a equalização da umidade os papéis-filtro eram dispostos em contato com a base e topo das amostras. Cada anel era cuidadosamente envolto em filme de PVC e disposto em caixa de isopor. Após aguardar o tempo recomendado para estabilização da sucção matricial os papéis, devidamente identificados (topo e base), tinham sua massa mensurada (massa úmida). Eram então levados à estufa para secagem e, logo após, determinada a massa (massa seca). De posse destes dados e juntamente com a equação de calibração do papel-filtro foi possível determinar a curva de retenção de umidade. O papel-filtro utilizado foi o da marca Whatman n° 42.

4.1.3.2. Porosimetria de Mercúrio

Os ensaios de Porosimetria ao Mercúrio foram realizados no Micromeritics PoreSizer 9320 do Laboratório da Fundação de Apoio à Física e à Química da Universidade de São Carlos (USP/São Carlos).

Na geotecnia existem vários trabalhos utilizando os dados de ensaios de porosimetria na previsão das propriedades hidráulicas dos solos, entre eles pode ser citados os trabalhos de Garcia-Bengachea et al. (1979) com permeabilidade não saturada, Prapaharan et al.(1985), Romero et al. (1999), Aung et al. (2001) e Simms & Yanful (2002) na determinação da curva de retenção de umidade, entre outros.

A técnica de porosimetria ao mercúrio é sem dúvida a técnica mais importante para a determinação de porosidade de materiais. Através deste ensaio é possível a determinação da distribuição de tamanho de poros, do volume total de

poros e da área específica do material bem como estimar através de correlações a curva de retenção de umidade.

A técnica se baseia no fato de que o mercúrio se comporta como um fluido não-molhante em relação à maior parte das substâncias. Por conseqüência, não penetra espontaneamente em pequenos furos destes materiais a menos que se aplique uma pressão sobre ele.

Se uma amostra de um sólido poroso é encerrada num recipiente dotado de um capilar, sendo feito o vácuo sobre a mesma e sendo preenchido o recipiente e o capilar com mercúrio, ao se aumentar a pressão sobre o líquido este penetrará nos poros da amostra reduzindo seu nível no capilar.

Através do registro da redução do nível de mercúrio no capilar, juntamente com a pressão aplicada, se obtém a curva porosimétrica.

Basicamente o ensaio de porosimetria ao mercúrio fornece duas curvas, a curva de volume acumulado e um histograma de frequência contínuo dos diversos diâmetros de poros constituintes da estrutura do solo. Com a primeira é possível obter-se, para um determinado diâmetro de poro, as porcentagens, em relação ao volume de vazios total da amostra, dos poros de diâmetro maior ou menor do que o considerado. Já a segunda curva, $[dv/d(\log D)]$ fornece os intervalos de diâmetros de poros por classe.

Através de relações propostas por Aung et al. (2001), foi possível se determinar de forma indireta a curva de retenção de umidade.

A teoria do método se baseia nas considerações de que os poros podem ser tratados como sendo canais de fluxo cilíndricos.

Segundo Fredlund e Raharadjo (1993) a equação de Kelvin pode ser utilizada para se determinar o diâmetro de poros equivalente, D , relacionado à sucção aplicada.

A equação de Kelvin é dada por:

$$\Delta P = \frac{4T \cos \alpha}{D} \quad \text{eq. 4.3}$$

Onde:

ΔP = diferença de pressão entre duas interfaces;

T = Tensão superficial do fluido;

α = Angulo de contato entre o fluido e o solo.

Assumindo que a diferença de pressão, ΔP , entre a água e o ar é a sucção ($u_a - u_w$) e que o ângulo de contato na interface entre ar-água e as partículas de solo é zero, o diâmetro equivalente de poro correspondente à interface ar-água é dado por:

$$(u_a - u_w) = -\left(\frac{4T_s}{D}\right) \quad \text{eq. 4.4}$$

Onde:

T_s = tensão superficial ($72,75 \times 10^{-3}$ N/m a 20°C)

No caso da porosimetria de mercúrio utiliza-se a equação 4.5 de Washburn, devido ao fato do mercúrio possuir características não molhantes. O ângulo de contato entre mercúrio e as partículas de solo (i.e. θ_w) pode variar entre 100° e 170° .

$$p = -\left(\frac{4T_{nw} \cos\theta_{nw}}{D}\right) \quad \text{eq. 4.5}$$

Onde :

T_{nw} = tensão superficial (485×10^{-3} N/m);

θ_{nw} = valor adotado de 130° .

Assumindo que com a injeção de mercúrio a água seja expulsa da estrutura do solo e o mesmo passe a ocupar o mesmo diâmetro de poros chega-se à equação:

$$(u_a - u_w) = -\left(\frac{T_w \cos\theta_w}{T_{nw} \cos\theta_{nw}} p\right) = 0,233 p \quad \text{eq. 4.6}$$

A partir desta equação é possível calcular a sucção equivalente a cada pressão de mercúrio aplicada. O grau de saturação equivalente pode ser calculado como:

$$Sr = 1 - Sr_{nw} \quad \text{eq. 4.7}$$

$$Sr_{nw} = n/n_0$$

4.1.3.3. Microscopia Digital de Varredura (MDV)

As análises e captura das imagens da lâmina petrográfica foram realizadas no Laboratório de Microscopia Digital (LMD) pertencente ao Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia (DCMM), localizado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). O equipamento utilizado foi um Microscópio Óptico Zeiss AxioPlan 2ie motorizado e controlado por software, munido de uma Câmara Digital AxioCam HR - 3900 x 3090 pixels a qual através do Software KS400 da Zeiss realiza o processamento e análise de imagens. Para o controle do microscópio óptico é utilizado o Software AxioVision da Zeiss.

A quantificação dos vazios, do solo em estudo, foi determinada com o auxílio da técnica de Processamento Digital de Imagem. Em princípio o Processamento Digital de Imagens é uma técnica que se utiliza de operações matemáticas para alterar os valores dos *pixels* de uma imagem digital, modificando-a com o intuito de preparar a imagem para ser analisada através de um software (Análise Digital de Imagens).

A Análise Digital de Imagens de solos consiste na extração e tratamento de dados quantitativos provenientes de imagens digitais da lâmina petrográfica de solo. Através deste método pode-se realizar medições mais rápidas, precisas e acuradas, possibilitando ainda a realização de medidas impossíveis de serem obtidas manualmente. Comumente, o termo Processamento Digital de Imagens é usado referindo-se globalmente a ambas as técnicas, processamento e análise digital. Isto é, de certo modo, justificável, já que geralmente as técnicas se intercalam, podendo a etapa seguinte do processamento ser determinada por uma etapa de análise.

Para a análise digital da imagem foi utilizado o software KS400 da Zeiss. Este software realiza processamento e tratamento de imagem, sendo possível através de seleções e inserções de filtros se determinarem os parâmetros de análise (cores dos pixels) que irão identificar os vazios. A contagem dos *pixels* referenciados como vazios (i.e. áreas em azul) relacionados à área total da lâmina petrográfica, fornece uma indicação da porosidade do solo. Segundo Moncada (2008), os resultados obtidos através da técnica de microscopia digital são úteis na determinação da macro-porosidade, (i.e na determinação dos poros maiores) onde

o corante utilizado na impregnação das laminas consegue uma boa impregnação. Mais adiante no Capítulo 5, será realizada uma comparação e análise entre os valores de porosidade obtidos através das diferentes técnicas.



Figura 4.2 – Microscópio Óptico Zeiss AxioPlan 2IE.

4.2. Ensaio Triaxiais

Neste item serão apresentados os equipamentos utilizados, com posterior descrição dos procedimentos realizados para a execução dos ensaios triaxiais. Serão descritas as propriedades das prensas triaxiais com deformação controlada e tensão controlada, respectivamente, ressaltando as diferenças entre estes equipamentos.

4.2.1. Prensa Triaxial com Deformação Controlada

Este equipamento pode ser dividido basicamente em uma célula triaxial equipada por instrumentos ligados a uma aquisição de dados, onde através de

válvulas e de uma prensa mecânica com velocidade constante as tensões dos ensaios são impostas.

Trata-se de uma prensa triaxial da Wykeham Farrance modelo WF10074 com capacidade de 10.000 kg. A taxa de deslocamento máxima é de 50 a 0.05 mm por minuto na faixa de utilização rápida e de 0.5 mm a 0.0005 mm por minuto na faixa lenta.

A prensa utilizada não possui sistema de servo controle sendo necessária a iteração do laboratorista no âmbito de controlar as pressões durante o ensaio.

A aquisição de dados é realizada pelo sistema Orion, o qual registra as leituras dos instrumentos em função do tempo transcorrido. Posteriormente é necessária a transformação das leituras realizadas da unidade básica de Vdc para unidades de engenharia. Esta conversão é efetuada através de uma pré-calibração dos instrumentos a qual fornece equações que podem ser facilmente programadas, por exemplo, no Excel.

Uma visão geral do equipamento é mostrada na Figura 4.3.

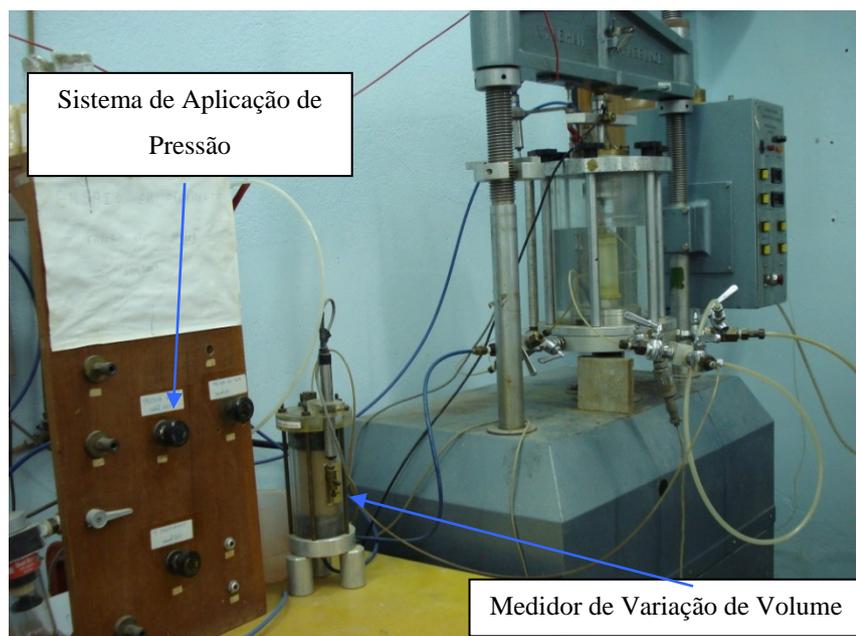


Figura 4.3 – Prensa Triaxial de Deformação Controlada - Wykeham Farrance WF10072.



Figura 4.4 – Sistema de Aquisição de Dados Orion.

4.2.1.1. Interface Ar/Água

A interface ar/água responsável pela aplicação de pressão confinante é a própria célula Triaxial, onde através do não preenchimento total de água na câmara, forma-se uma interface. Este procedimento foi adotado visando à integridade da célula de carga, pois ocorreram danos em células anteriormente utilizadas. Tais danos foram causados pela entrada de água, apesar destas serem apresentadas pelo fabricante como submersíveis.

Seu funcionamento consiste na aplicação de pressão de ar na parte superior da câmara triaxial, na parte não preenchida por água. Sendo assim esta pressão é diretamente transmitida à água de confinamento e ao corpo de prova.

Alguns cuidados devem ser adotados para se utilizar a câmara triaxial como interface. Pois esta prática ocasiona a dissolução de ar na água confinante, este ar dissolvido em ensaios de longa duração tende a atravessar a membrana de látex gerando a dessaturação do corpo de prova, comprometendo os resultados dos ensaios. Entretanto, para verificar a ocorrência deste processo é necessário observar o aparecimento de ar entre a membrana e o corpo de prova ao final do ensaio, na etapa de desconfinamento do corpo de prova com as drenagens

fechadas. A ocorrência das bolhas de ar evidencia a dessaturação do corpo de prova devido à dissolução de ar na água confinante que atravessou a membrana.

4.2.1.2. Medidor de Variação de Volume

Trata-se de um transdutor de variação volumétrica do tipo Imperial College (de Campos, 1984). Onde a medição da variação de volume é realizada através de uma interface composta por um recipiente cilíndrico dentro do qual se encontra um conjunto de borrachas de vedação da Bellofram fixadas e vedadas nas extremidades, formando assim duas câmaras (superior e inferior), com um cilindro em PVC, de diâmetro ligeiramente inferior ao reservatório externo, situado entre estas borrachas. Ela pode ser visualizada na Figura 4.3.

Seu funcionamento, é simples, consiste na aplicação de ar câmara inferior formada pela borracha Bellofram a qual empurra o cilindro de PVC para cima comprimindo assim a água contida na câmara superior. Todo e qualquer deslocamento do cilindro de PVC é medido através de um LSCDT, o que possibilita posteriormente calcular a variação de volume, visto que através do deslocamento e do conhecimento da área da base do recipiente cilíndrico pode-se encontrar o volume tanto de saída de água quanto de entrada no sistema.

A capacidade da câmara que contém água é de 300 ml, podendo suportar pressões de ar de 9 Bar e com precisão de 0.01 ml.

Para o correto funcionamento a câmara superior que contém a água deve estar completamente preenchida sem haver a existência de bolhas de ar. O sistema deve ser estanque e pode ser calibrado com o auxílio de uma bureta graduada.

4.2.1.3. Câmara Triaxial

O objetivo primordial da câmara triaxial é garantir a aplicação das tensões principais e de poro-pressão no corpo de prova. De preferência, ela ainda deve permitir a medição interna da variação de altura e diâmetro da amostra, além de seu volume. A câmara utilizada no presente trabalho tem paredes em acrílico (o que possibilita a visualização do corpo de prova durante o ensaio), com dimensões de 380 mm de altura, diâmetro de 270 mm e capacidade de pressão interna de 900

kPa. Esta célula teve sua base adaptada para trabalhar com corpos de prova de 1 1/2", pois originalmente era destinada a ensaios em corpos de prova de 4". A utilização desta câmara maior teve como motivação a necessidade de se possuir um espaço maior entre o corpo de prova e a parede de acrílico, para que fosse possível a instalação de medidores de deformação axial, tipo *Imperial College*.

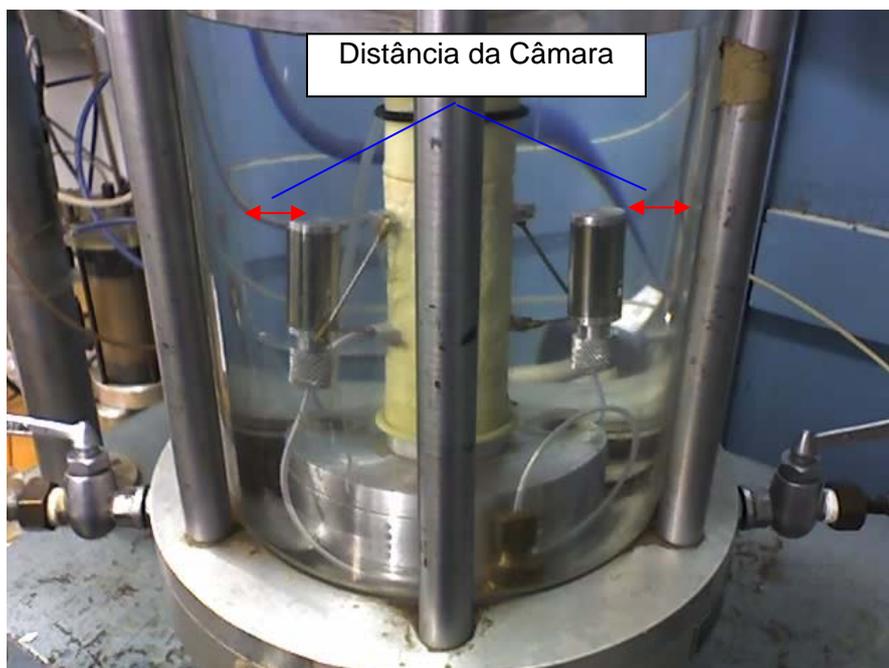


Figura 4.5 – Câmara Triaxial.

A base da câmara triaxial, em duralumínio, possibilita através de uma série de válvulas tipo esfera, o fluxo de água através do corpo de prova assim como o fluxo de água até o transdutor de poro-pressão e de pressão confinante.

Por este equipamento possuir somente um transdutor, que servia tanto para leituras de poro-pressão quanto de tensão confinante, foi necessária a utilização de conexões que possibilitavam a comutação no momento das leituras. Esta característica impôs uma maior dificuldade para a execução do ensaio. Porém em se tratando de minimizar os erros provenientes de leituras realizadas com equipamentos distintos, esta técnica se mostra mais eficiente.

A vedação da câmara é garantida por uma série de anéis O’rings que estão dispostos tanto no orifício de passagem da haste da célula de carga, quanto na ligação da base com a câmara.

4.2.1.4. Transdutor de Poro-Pressão e Tensão Confinante

A medição da poro-pressão foi realizada através de um transdutor de pressão da Schaevitz modelo P723-0001 com capacidade de leitura na faixa de 0-1035 kPa. Este equipamento se encontra ligado ao sistema de aquisição de dados onde é possível acompanhar as leituras durante o ensaio.

O transdutor é conectado a base da câmara através de um dispositivo confeccionado em acrílico, o qual possui um sistema para a drenagem de bolhas de ar. Este dispositivo é de relevante importância visto que promove a retirada de bolhas que ocasionariam erros nas leituras do equipamento.

4.2.1.5. Controlador de Pressão

O sistema de aplicação de pressão, como pode ser visto na Figura 4.3, é constituído por válvulas de precisão ligadas à rede de ar comprimido do laboratório que fornece uma pressão máxima na linha de 700 kPa. O controle é realizado manualmente pelo operador da prensa. Este processo consiste na regulagem da pressão via leituras fornecidas pelo transdutor.

O sistema possui três válvulas, sendo uma para aplicação de pressão de ar no topo da câmara triaxial, o que confere a pressão confinante, outra para aplicação da contrapressão e, a última, em se tratando de um ensaio de permeabilidade, possibilita a aplicação de um gradiente hidráulico entre o topo e a base do corpo de prova.

São válvulas reguladoras de pressão da Watson Smith que trabalham na faixa de 10-820 kPa podendo alcançar a pressão máxima de 1030 kPa.

4.2.1.6. Prensa Triaxial Eletromecânica

Trata-se de uma prensa triaxial, de deformação controlada, da Wykeham Farrance modelo WF10072 projetada para trabalhar como um carregamento axial máximo de 10.000 Kg. Sua operação é manual via seletores em seu painel de comando. A velocidade de deslocamento é ajustada de maneira analógica, não havendo a necessidade de iteração com o sistema de engrenagens. Existe ainda a

opção de se estabelecer limites de deslocamentos que param o funcionamento da prensa, evitando assim acidentes que possam vir a danificar o equipamento.

4.2.2. Prensa Triaxial Tipo Bishop-Wesley com Tensão Controlada ou Deformação Controlada

O equipamento utilizado foi um triaxial tipo Bishop-Wesley desenvolvido no *Imperial College*, Londres, que permite a realização de uma extensiva gama de ensaios em diferentes trajetórias de tensões. Trata-se de um sistema servo controlado.

Este equipamento triaxial pode ser descrito como sendo composto por uma célula triaxial operada por um sistema de aplicação de pressões o qual é servo controlado, de maneira conjunta, por um software e por uma aquisição de dados. Na seqüência será abordada, de maneira semelhante ao item anterior, a descrição do equipamento por partes.

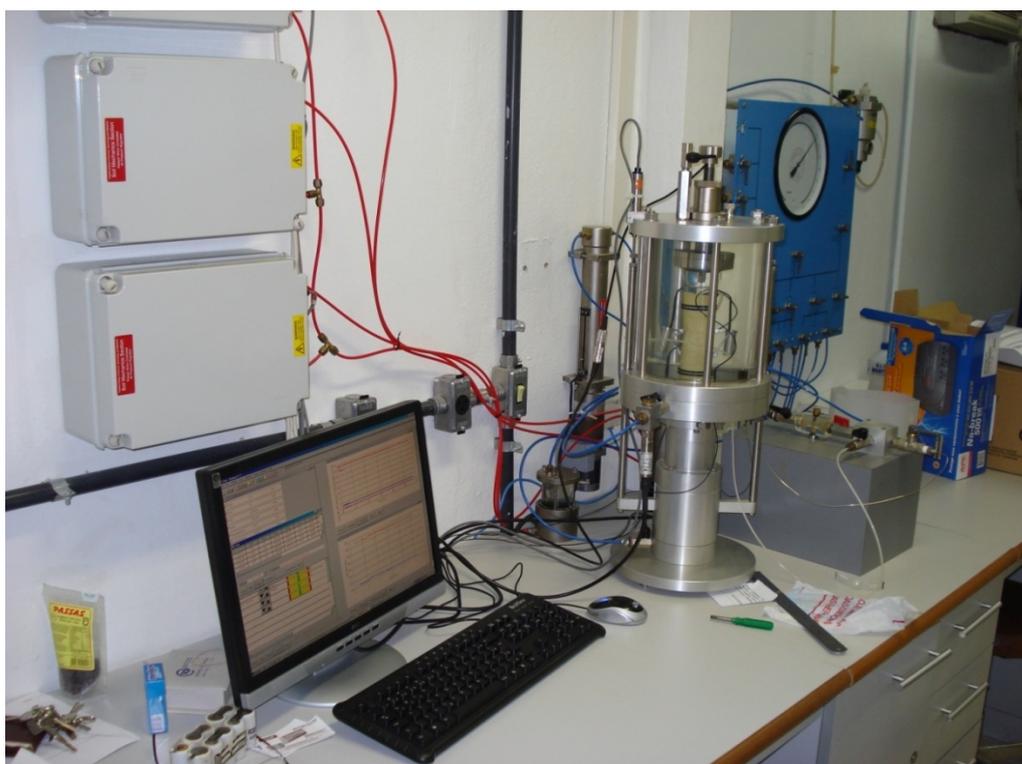


Figura 4.6 – Equipamento Triaxial com Tensão Controlada (*Imperial College*).

4.2.2.1. Interface Ar/Água

As interfaces de ar/água, utilizadas pela prensa Bishop Wesley do *Imperial College*, são responsáveis pela conversão de pressão de ar em pressão de água, conferindo não só a aplicação de tensão confinante e de poro-pressão, mas também auxiliando na transmissão tensão desviadora. Sua faixa de pressões de trabalho é análoga à da câmara triaxial podendo chegar ao máximo de 900 kPa . Este limite é imposto pelas propriedades mecânicas do acrílico utilizado em seu reservatório.

4.2.2.2. Medidor de Variação de Volume

O sistema de medição de variação de volume utilizado neste equipamento segue o princípio de funcionamento do já descrito medidor de variação de volume da prensa Wykeham Farrance, apresentando um *lay-out* muito parecido. Sua capacidade é de 50cm³ e pressão de trabalho limitada pelo sistema de aplicação de pressão em 900 kPa. Possui um LSCT como instrumentação o que permite, como já mencionado, a determinação da variação de volume.

4.2.2.3. Câmara triaxial

Da mesma forma que a câmara descrita anteriormente, suas paredes são confeccionadas em acrílico, com dimensões de 260 mm de altura, diâmetro de 200 mm e capacidade de pressão interna de 900 kPa. Trata-se de uma peça original do *Imperial College*, não havendo sido realizadas modificações. Trabalha com corpos de prova de 1 1/2". Em seu projeto foi levada em consideração a necessidade de espaço entre a amostra e a parede interna de acrílico para que fosse possível a utilização de medidores de deformação axial (tipo *Imperial College*) fixados no corpo de prova.

4.2.2.4.

Transdutor de Poro-Pressão e Tensão Confinante

As leituras de poro-pressão são realizadas através de um transdutor de pressão com capacidade de leitura na faixa de zero a 1500 kPa modelo PR-27 W/8763-15 do fabricante Keller . Já as leituras de tensão confinante são realizadas por um transdutor similar com as mesmas características de funcionamento e operação. Estes equipamentos encontram-se conectados ao sistema de aquisição de dados, onde é possível acompanhar durante o ensaio as leituras em tempo real.

O transdutor de tensão confinante encontra-se ligado à célula triaxial através de uma peça em duralumínio, que permite a comunicação da pressão confinante com o transdutor e ainda via um dreno posicionado na parte superior que possibilita a retirada de bolhas de ar da linha.

Já o transdutor que mede a poro-pressão é acoplado à base da câmara através de dois tubos em aço inox conectados a um dispositivo confeccionado em acrílico, o qual possui um sistema para a drenagem de bolhas. A utilização de tubos de aço inox promove a minimização do efeito de dilatação da tubulação, o que garante um tempo de resposta mais rápido ao conjunto.

A utilização de instrumentos distintos para medição de pressão pode gerar a incerteza quanto a possíveis diferenças em suas leituras. Porém, neste equipamento, por se tratar de uma prensa com servo controle seu software (TRIAx 5) realiza a correspondência entre as leituras e a pressão aplicada. Isto é possível, pois existe a opção de se calibrar todos os transdutores de uma só vez.

4.2.2.5.

Controlador de Pressão

O conjunto de equipamentos responsáveis pelo controle de pressão é constituído por 3 Box supridas por um compressor Kaeser linha Premium, que confere uma pressão máxima na linha de 2000 kPa.

As assim chamadas Box contêm internamente um sistema formado por uma válvula de precisão conectada a um motor de passo bem como uma eletrônica para o processamento dos sinais de comando e controle do motor de passo.

Cada Box de pressão é responsável pela aplicação de uma determinada pressão podendo ser a tensão confinante, poro-pressão ou ainda de cisalhamento. Esta característica de controle de tensão cisalhante bem como de tensão confinante e poro-pressão é que permite com que este equipamento realize uma ampla faixa de ensaios, em diferentes trajetórias de tensões.

Ressalta-se que podem ser realizados ensaios com controle de deformação, pois este equipamento possui um dispositivo chamado de CRSP que, através do deslocamento constante de seu pistão (sem fim), movido por um motor de passo, faz com que a prensa se desloque numa taxa fixa de deslocamento.

4.2.2.6. Célula Triaxial Tipo Bishop-Wesley

Trata-se de uma prensa triaxial de tensão controlada do Imperial College tipo Bishop e Wesley (1975). Sua operação é totalmente automatizada através de um software suprido de dados de input fornecidos pelo laboratorista bem como de dados provenientes da instrumentação. As tensões de ensaio são ajustadas de maneira eletromecânica seguindo os valores definidos pelo software em atendimento à programação imposta.

O topo da célula e a célula em acrílico são similares aos dos ensaios triaxiais convencionais. O pedestal contém conexões que permitem a drenagem do corpo de prova bem como a medição de poro-pressão e é conectado a RAM. A RAM move-se na vertical, guiada em um movimento linear. Dois Belloframs de borracha são utilizados para a vedação. O posicionado no topo permite a vedação do fluido da célula triaxial e o inferior é responsável pela contenção do fluido da câmara inferior.

O carregamento axial é aplicado através da pressurização da câmara inferior. O carregamento axial é medido por uma célula de carga submersível contida no interior da célula triaxial. Duas hastes de extensão são conectadas no pistão da RAM e ao LSCDT auxiliando na medição dos deslocamentos axiais. As pressões, confinante e de poro pressão, são medidas por transdutores. O sistema de contrapressão, se necessário, pode ser conectado à base da amostra. A medição de variação de volume pode ser realizada pelo medidor de variação de volume conectado na linha de contrapressão.

O sistema é caracterizado por ser muito versátil, e auto-suficiente, não necessitando de aparato para carregamento. Pode ser utilizado para a realização de vários tipos de ensaios, e pode aplicar extensão axial assim como compressão. Detalhes do funcionamento são dados por Bishop e Wesley (1975).



Figura 4.7 – Prensa Pneumática (*Imperial College*).

4.2.3. Eletrônives Tipo Imperial College

Para a instrumentação e medida da deformação axial interna na prensa com deformação controlada foram desenvolvidos um par de eletrônives.

Como pode ser observado na Figura 4.8, é composto por uma ampola encapsulada em um recipiente metálico ligado a um par de “pernas”. Estas pernas transmitem ao sensor as deformações sofridas pelo corpo de prova. As deformações são calibradas em função da inclinação do eletrônível.

O procedimento de instalação está descrito no item 4.2.4.

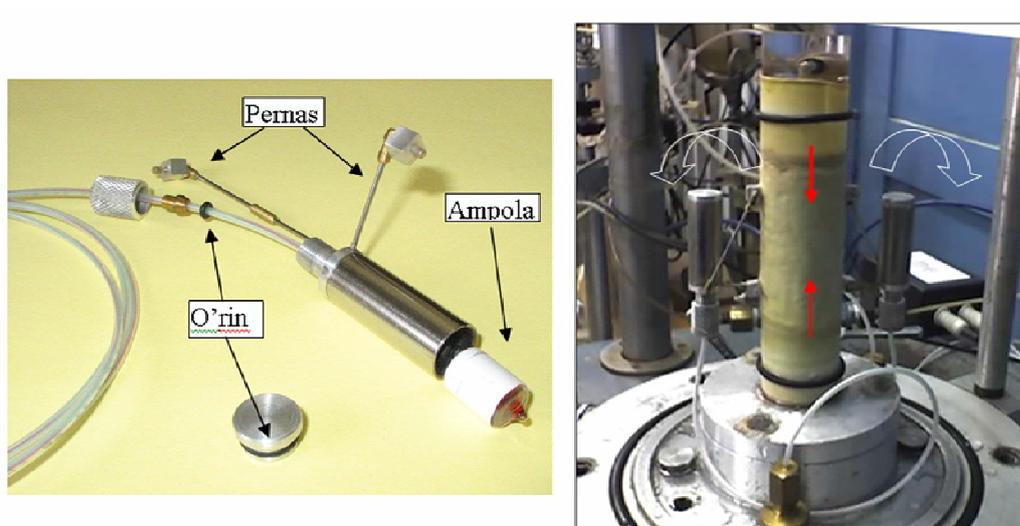


Figura 4.8 – Eletrônives (Imperial College).

4.2.4. Procedimentos Iniciais e Materiais Utilizados

O procedimento para realização dos ensaios triaxiais consistiu nas seguintes etapas:

- Confecção do corpo de prova;
- Colocação do mesmo no pedestal do equipamento Triaxial;
- Instalação dos eletrônives;
- Processo de saturação;
- Adensamento;
- Cisalhamento;

Os procedimentos adotados em todos os ensaios triaxiais até o estágio de cisalhamento são semelhantes. Consistem em moldar o corpo de prova com as dimensões de 1 ½” (38mm) por 3” (76mm) com respectiva determinação de suas características como umidade e massa. Posteriormente, antes da disposição do corpo de prova no equipamento triaxial, as linhas eram saturadas as interfaces ar/água e o transdutor de variação de volume eram completados.

Com estas etapas realizadas as pedras porosas e os papéis filtro eram dispostos respectivamente no pedestal e no topo do corpo de prova. Posteriormente o corpo de prova era colocado no pedestal a membrana de látex juntamente com os o’rings eram instalados.

O próximo procedimento adotado era o de fixar os eletrônicos, medidores de deformação axial interna, na membrana. Para tanto foi utilizado o adesivo instantâneo 495 da Loctite, próprio para fixação de metal em superfícies flexíveis.

A partir deste passo a câmara triaxial era fechada e preenchida com água. Na seqüência era dado o início do processo de saturação do corpo de prova. Foi adotado em todos os ensaios triaxiais o método da contrapressão, com tensão efetiva de 10 kPa. Para a saturação, com dissolução do ar na água, foi preciso aplicar estágios que chegaram a ter como pressão confinante 700 kPa. No equipamento Triaxial servo controlado o processo de saturação apresentou um velocidade maior que o operado manualmente. Isso devido ao fato da saturação ocorrer seguindo uma rampa programada. O controle realizado fazia com que a tensão efetiva ficasse fixada em 10 kPa enquanto o aumento das tensões confinantes e de poro-pressão ocorriam.

Com a medição do parâmetro B de Skempton estando entre 0,95 e 1,0 era iniciado o processo de adensamento. Na seqüência a amostra era cisalhada.

4.2.4.1.

Confecção dos Corpos de Prova

Os corpos de provas utilizados na presente pesquisa foram confeccionados a partir de blocos de solo amostrados no trabalho desenvolvido por Oliveira em 1999. Os referidos blocos encontravam-se desde então acondicionados na câmara úmida do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, devidamente lacrados com filme de PVC, papel alumínio, talagarça e parafina., como representado na Figura 4.9.



Figura 4.9 – Abertura de Bloco para Moldagem.

4.2.4.1.1. Corpos de Prova Não Amolgados

Com o intuito de facilitar a moldagem, os blocos não amolgados de cerca de 30 cm de arestas, extraídos em campo, foram fracionados em outros blocos menores, com dimensões aproximadas de 15 cm x 5 cm x 5cm. Estes blocos menores foram dispostos dentro de uma caixa de isopor vedada. O material foi todo armazenado na câmara úmida do laboratório.

Conforme pode ser observado na Figura 4.10, os prismas oriundos do fracionamento do bloco maior, eram cuidadosamente instalados sobre um torno manual, específico para a moldagem de corpos de prova cilíndricos, com 1 ½” de diâmetro.



Figura 4.10 – Preparação de Corpo de Prova.

Após a moldagem do cilindro de solo, este corpo de prova era disposto em um berço metálico com exatamente 3” de comprimento onde suas faces transversais eram desbastadas, tornando-as paralelas entre si, resultando em amostras com dimensões similares.

Após este procedimento de moldagem, os corpos de prova tinham sua massa aferida para determinação do teor de umidade final do ensaio triaxial assim como propriedades físicas como o índice de vazios. Pelo fato das dimensões terem sido condicionadas ao berço, tanto na altura quanto no diâmetro, não houve a necessidade das dimensões serem aferidas através do paquímetro.

4.2.4.1.2. Corpos de Prova Amolgados

Para os ensaios com material amolgado, foi adotando o procedimento de destorroar corpos de prova confeccionados utilizando-se o torno manual, assim como os corpos de prova não amolgados. O teor de umidade natural utilizado foi determinado durante a moldagem dos corpos de prova não amolgados. Pequenas correções do teor de umidade foram realizadas quando o material destorroado apresentava uma umidade natural inferior a 10%.

Para a moldagem dos corpos de prova foi utilizado um molde tripartido, onde o solo foi compactado estaticamente, em 4 camadas iguais. O índice de vazios aos quais os corpos de prova foram moldados foi similar ao dos corpos de prova não amolgados.

A determinação das dimensões dos corpos de prova seguiu a metodologia citada no item anterior.

4.2.4.2. Membranas Papel Filtro e Pedras Porosas

As membranas utilizadas eram de látex, fornecidas pela Wykeham Farrance. Elas foram testadas para a verificação de ausência de furos antes da execução de todos os ensaios. O teste consistiu em vedar suas extremidades e aplicar ar dentro da membrana, que posteriormente era imersa em água para a verificação da existência de bolhas de ar.

O papel filtro utilizado era da marca Whatman nº 54. Os mesmos foram utilizados no topo e base do corpo de prova.

As pedras porosas eram devidamente saturadas e mantidas em água destilada até a montagem do ensaio. Ao final de todos os ensaios elas eram levadas a um equipamento de ultrassom e mantidas “vibrando” por 30 minutos, para retirar eventuais obstruções de seus poros.

4.2.4.3. Saturação das Linhas do Equipamento Triaxial

Todas as linhas da base e do *top cap* eram saturadas antes de se colocar o corpo de prova na prensa. Este processo consistia em percolar água através das tubulações do equipamento triaxial visando à retirada de qualquer bolha de ar que pudesse estar presente nas linhas.

Para a aferição da saturação do sistema de medição de variação de volume era aplicada uma pressão de ar na base do mesmo com suas saídas de água fechadas. Em princípio o aumento da pressão não deve gerar variações de volume. Logo, sendo notado algum indicativo de existência de ar no sistema (*i.e.* variação de volume) o processo de saturação era reinicializado.

4.2.5. Metodologia de Cálculo dos Ensaio

4.2.5.1. Ensaio Triaxial com Deformação Controlada.

As leituras e o armazenamento dos dados foram realizados através do sistema de aquisição Orion. Os dados provenientes do Orion foram, via software ORIONT, tratados e disponibilizados em formato de arquivo. Este processamento dos dados tornou possível a manipulação dos dados através de uma planilha eletrônica do tipo Excel, onde com o auxílio das equações de calibração dos instrumentos, as leituras foram transformadas de Vdc para unidades de engenharia.

Após este processo, uma análise foi realizada na leitura dos instrumentos, para se determinar os valores iniciais (L_0) em cada etapa do ensaio, possibilitando

assim a correção dos dados (e.g. encosto da célula de carga com a correspondente desconsideração da deformação axial até este momento).

4.2.5.2. Ensaio Triaxial com Tensão Controlada

Os dados provenientes dos ensaios realizados com o equipamento triaxial tipo *Imperial College* foram processados utilizando o software TRIAX5 o qual os converte automaticamente em dados de engenharia. Para tanto, são utilizadas as calibrações pré-definidas pelo usuário. Os dados podem ser ainda exportados para uma planilha eletrônica do tipo Excel, onde é possível a manipulação dos mesmos e a representação dos resultados na forma de gráficos.