

4.

Ensaio Realizados e Metodologias Empregadas

O presente capítulo apresenta os procedimentos utilizados nas amostragens de solo, as técnicas experimentais de execução dos ensaios de laboratório e os equipamentos utilizados para a realização dos mesmos. O programa experimental da presente tese compreendeu: (a) a caracterização geotécnica dos solos estudados, (b) a realização de ensaios de compressão triaxial CIU com medida de poropressão no meio do corpo de prova e (c) ensaios de adensamento CRD.

As propriedades (características particulares) são dados qualitativos ou quantitativos utilizados para diferenciar materiais ou grupo de materiais (propriedades de “natureza”) ou para indicar um possível comportamento, em determinado estado, em relação a certo fenômeno (propriedades de “estado”). As propriedades de “natureza” são entendidas como propriedades de constituição e são independentes da estrutura; já as propriedades de “estado” dependem da estrutura (Vargas, 1982; Cruz, 1996). Por propriedades de “natureza” entende-se a determinação da composição física, propriedades plásticas, composição mineralógica e composição química. Como propriedades de “estado” considera-se a compressibilidade, a permeabilidade e a resistência ao cisalhamento (Mitchell, 1993).

4.1.

Ensaio de Caracterização

A propriedade física comumente utilizada para identificar um solo, propriedade de “natureza”, é a composição física (ou textura) que pode ser identificada qualitativamente, através da denominada análise tátil-visual, e quantitativamente, através de análise granulométrica. A análise tátil-visual é, em geral, utilizada em campo e a análise granulométrica em laboratório

Para a caracterização física dos solos, realizou-se ensaios 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.

As amostras foram separadas de acordo com o procedimento de secagem prévia (NBR 6457/84).

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:

$$IA = \frac{\text{Índice de Plasticidade (IP)}}{\% < 2 \mu m}$$

Classificação segundo a fração argila presente no solo:

- $Ia < 0,75$ → inativas
- $1,25 > Ia > 0,75$ → atividade normal
- $Ia > 1,25$ → 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).

4.1.1.

Granulometria

Os solos provenientes de cada local de amostragem tiveram suas curvas granulométricas determinadas com secagem prévia do solo. Os ensaios de granulometria seguiram as prescrições da norma NBR 7181/84, com algumas adaptações. A ABNT recomenda a realização de ensaios de sedimentação com material passante na peneira de 2 mm (#10), e os realizados foram feitos com o material passante na peneira de 0,42 mm (#40). O ensaio de sedimentação foi realizado com o defloculante que a ABNT recomenda (hexametáfosfato de sódio).

Em linhas gerais, os ensaios de sedimentação consistiram em colocar 50 gramas de solo destorroado, seco ao ar, passante na peneira # 40 em 125 ml de defloculante (hexametáfosfato) e deixar em repouso por um período de 24 horas. Só então se procedia à dispersão mecânica e colocava-se a mistura em uma proveta de 1000 ml cujo volume era completado com água destilada.

A lavagem do material (suspensão) proveniente do ensaio de sedimentação na peneira de abertura 0,075 mm (peneira nº 200) foi realizada com água potável a baixa pressão, com movimentos circulares de peneiramento e sem o auxílio da mão do operador do ensaio.

4.1.2.

Limites de Atterberg

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade seguiram as determinações das normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984, respectivamente.

Todos os ensaios foram realizados com amostras destorroadas, secas ao ar e passantes na peneira # 40 acrescentando-se o fluido (água).

4.1.3.

Densidade dos grãos (Gs)

Na determinação do peso específico dos grãos, utilizou-se 25 gramas de solo passante na peneira # 40. A deaeração foi promovida pela aplicação de vácuo durante 15 minutos ou até a detecção de ausência total de bolhas de ar. O procedimento adotado

está de acordo com a norma NBR 6508/1984. Foram determinados os Gs apenas dos solos naturais.

4.2.

Caracterização química

As propriedades químicas podem ser igualmente consideradas propriedade de “natureza”. Apesar de não ser usualmente avaliada em geotécnica. A composição química pode ser avaliada pelos índices químicos, dos quais os mais encontrados em trabalhos geotécnicos são o pH, condutividade elétrica, aquecimento e as relações moleculares sílica-alumina (ki) e sílica-sesquióxidos (kr).

4.3.

Caracterização mineralógica

A composição mineralógica é importante para a explicação do comportamento de muitos solos tropicais. Por exemplo, a existência de esmectita, que apresenta propriedade de aumento da dupla camada em presença de água, pode conferir ao solo um comportamento expansivo.

A caracterização mineralógica das amostras foi obtida por meio dos ensaios de difração por raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (análise térmica diferencial e observação na lupa binocular).

4.3.1.

Difração por raios-X (DRX)

Os ensaios de difração por raios-X foram executados no Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia (DCMM) da PUC-Rio, utilizando um difratômetro Siemens D5000, com irradiações realizadas no intervalo de 0 a 30°. A velocidade de varredura da amostra no difratômetro foi de 0,02° por segundo.

Na caracterização da fração areia fina, utilizou-se material passante na peneira # 40 e a análise foi feita pelo método do pó. Já para caracterizar as frações silte e argila

fabricou-se lâminas delgadas pelo método do gotejamento com material passante nas peneiras # 200.

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 seguinte equação.

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

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.

4.4.

Ensaio triaxiais

Todos os ensaios triaxiais foram executados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

Ensaio de compressão triaxial são ensaios muito utilizados para análise do comportamento mecânico e obtenção de parâmetros de resistência ao cisalhamento e deformabilidade de solos. Nestes ensaios um corpo de prova cilíndrico de solo (usualmente com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura) é envolvido por uma membrana de látex e ensaiado em uma câmara triaxial que possibilita a aplicação de pressão de água deairada ao corpo de prova, denominada pressão confinante (σ'_c). Após a aplicação da pressão confinante, um carregamento axial de compressão é dado pelo movimento da câmara triaxial relativo a um pistão fixo acoplado ao topo do corpo de prova através da utilização de um cabeçote, gerando uma tensão denominada tensão axial (σ'_d). Sob estas condições, a tensão axial no corpo de prova constitui a tensão principal maior (σ_1), e as tensões principais intermediária (σ_2) e menor (σ_3) são iguais à pressão de confinamento, então, tem-se: $\sigma'_2 = \sigma'_3 = \sigma'_c$ e $\sigma'_1 = \sigma'_d + \sigma'_c$. Tubos especiais para drenagem conectados ao topo e à base do corpo de prova permitem o fluxo de água deairada tanto para dentro como para fora do mesmo. Através dos tubos de drenagem são realizadas a aplicação de contra-pressões para saturação da amostra, a medição de poropressões durante ensaios não drenados e a medição de variações volumétricas durante ensaios drenados.

No decorrer de um ensaio de compressão triaxial são feitas leituras da carga axial aplicada ao corpo de prova, da deformação axial, da variação volumétrica e/ou da poropressão. A aplicação da pressão de confinamento e da tensão desviadora constitui dois estágios distintos do ensaio de compressão triaxial. As condições de drenagem durante o estágio de cisalhamento caracterizam o tipo de ensaio que comumente pode ser: (a) ensaios não adensados e não drenados (UU); (b) ensaios adensados isotropicamente e não drenados (CIU) e (c) ensaios adensados isotropicamente e drenados (CID). (Siveira, 2008).

Descrições detalhadas dos equipamentos utilizados nos ensaios triaxiais e procedimentos de ensaio relativos aos diversos tipos são descritos por Head, (1986). Algumas referências importantes a respeito do estado da arte relativo aos ensaios de compressão triaxial são os trabalhos de La Rochelle et al. (1988), Germaine & Ladd (1988), Baldi et al. (1988) e Lacasse & Berre (1988). Estas referências encontram-se apresentadas no simpósio promovido pela ASTM no ano de 1986, denominado Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock.

Descreve-se a seguir, os equipamentos utilizados neste tipo de ensaio, bem como as metodologias empregadas, dando-se maior ênfase a equipamentos e procedimentos desenvolvidos no presente trabalho.

4.4.1.

Equipamentos utilizados

4.4.1.1.

Prensa triaxial

Este equipamento pode ser dividido basicamente em uma célula triaxial equipada por instrumentos ligados a um sistema de aquisição de dados e de uma prensa mecânica com velocidade constante na qual as tensões dos ensaios são impostas. Uma visão geral do equipamento é mostrada na Figura 4.1.

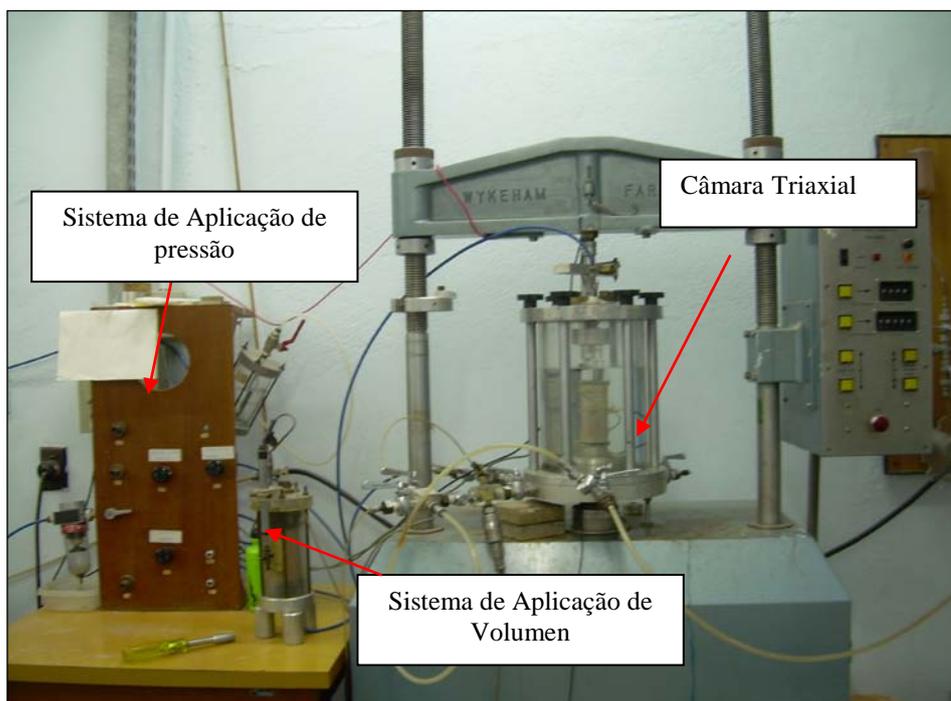


Figura 4.1: Prensa Triaxial de Deformação Controlada - Wykeham Farrance WF100072.

O objetivo da célula é garantir a aplicação das tensões principais e de poropressão 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 célula 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 até 900 kPa. O tamanho dos corpos de prova foram de 4". Ver Figura 4.2).



Figura 4.2: Câmara Triaxial.

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 do minitransdutor de poropressão.

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.

A outra parte do equipamento 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 servo controlado 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.



Figura 4.3: Sistema de Aquisição de Dados Orion.

4.4.1.2.

Sistema de aplicação de pressão

Na aplicação da pressão confinante e da contrapressão, utilizou-se um sistema de ar comprimido controlado por um painel de válvulas reguladoras de pressão (ver Figura 4.1). No caso da contrapressão o ar comprimido era aplicado no medidor de variação de volume (MVV) que transmitia pressão para o fluido (água).

No caso da pressão confinante, a interface ar/água foi responsável pela aplicação à 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.

4.4.1.3.

Transdutores de força, de deslocamento e de pressão

As células de carga utilizadas são do fabricante Wykeham-Ferrance, com capacidade máxima de 5 kN e exatidão de 0,01 N. Para obtenção dos deslocamentos foram utilizados extensômetros elétricos da marca LSC Transducer, com cursor de 50 mm e resolução de 10 μm .

Os transdutores empregados na medida das pressões na câmara e poropressões também são da Wykeham-Ferrance, com resolução de 1 kPa e capacidade máxima de 1000 kPa. Todos os transdutores foram calibrados e testados antes da campanha de ensaios.

4.4.1.4.

Medidores de volume

As variações de volume são obtidas através de medidores de variação volumétrica (MVV), tipo Imperial College (de Campos, 1984), fabricados na PUC-Rio, com resolução de 0,01cm³ (Figura 4.1).

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.

4.4.1.5.

Mini Transdutor de Poropressão no Meio do Corpo de Prova

O minitransdutor de poropressão no medio do corpo de prova foi o instrumento mais importante para o desenvolvimento desta pesquisa, foi utilizado do tipo Druck, modelo PDCR-81 com pedra porosa aderida ao corpo do aparelho. Esse transdutor foi escolhido por apresentar grande precisão e confiabilidade e por ser compatível com uma alimentação de 5V DC com capacidade de 150 psi (≈ 1020 KPa).

Consiste de uma espessura de 0.09 mm, cristal único, diafragma de silicone com um “*strain gauge*” ativo como ponte dentro da superfície. A pedra porosa, com alta entrada de ar, é colocada na ponta do transdutor, coberto pelo diafragma, um dos lados do diafragma é exposto para a atmosfera via um fio enquanto o outro lado é exposto para a pedra porosa. A deformação do diafragma causa um cambio na voltagem medido a traves do strain gagen que é igualado à pressão. Tradicionalmente, o PDCR-81 vinha sendo usado solo para a medição das poro-pressões positivas em solos saturados (Kanthasamy *et al.* 1999). O pequeno tamanho do PDCR-81 permite ser inserido facilmente dentro do corpo de prova, ocasionando mínima interferência, conduz a uma rápida resposta do tempo é mais bem usado para monitoramento em tempo real das poro-pressões durante o ensaio, incluindo eventos dinâmicos.

Estes transdutores são frequentemente usados numa variedade de aplicações de provas geotécnicas. São usados em triaxiais (compressão) e ensaios não drenados de argilas pre adensadas para captar bem a localização da deformação. (Saada et al. 1995)

Antes de usar o PDCR81 para a medição das poropressões, deve-se saturar por enchimento da pedra porosa e das pequenas aberturas entre a pedra com água. Para calibração do transdutor foi necessária a confecção de uma câmara especial de acrílico, bem como a montagem de uma árvore de calibração. O equipamento é mostrado na Figura 4.4.

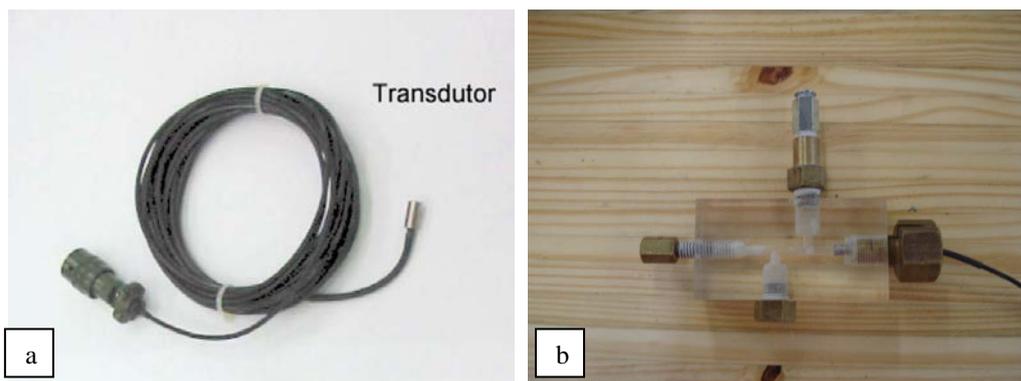


Figura 4.4 – Transdutor (a) e Câmara de acrílico para Saturação do Transdutor (b).

A seguir, usou-se uma balança de peso morto fabricada pela Bunderberg, número de serie 115431280 D, faixa 1 a 10 bar, classe 0,025% de precisão. O transdutor foi calibrado usando-se as seguintes etapas:

1. Instalação do transdutor na balança de peso morto;
2. Árvores de ar da linha de conexão da balança de peso morto com o transdutor;
3. Aplicação de uma carga na balança de peso morto e leitura da voltagem pelo sistema de aquisição de dados;
4. Aumento da carga na balança gradativamente até uma pressão de 8 bar;

Este procedimento foi repetido 3 vezes para o transdutor. Tendo todas apresentado excelente repetibilidade (coeficiente de ajuste linear de 1,0000) e estereose desprezível. Uma vez saturado e calibrado, pode ser inserido na amostra de solo e as poropressões podem ser determinadas.

4.4.1.6.

Acessórios: membrana de látex, papel filtro e pedras porosas

Foram utilizadas membranas de látex importadas, fornecidas pela Wykeham Farrance. As membranas utilizadas eram novas não havendo risco de furos, não houve perda de ensaio por furo na membrana.

O papel filtro empregado foi o da marca Whatman no 54, sendo previamente cortado antes de cada ensaio. Foi utilizado papel filtro na base e no topo dos corpos de

prova. As pedras porosas eram previamente saturadas e mantidas em água destilada até a montagem do ensaio.

4.4.2.

Procedimentos adotados nos ensaios

Os procedimentos adotados seguiram recomendações dadas por Bishop e Henkel (1962) e Head (1986).

4.4.2.1.

Confecção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir de amostras indeformadas. Para tanto, extraia-se um paralelepípedo dos blocos com o auxílio de um extrator de amostras Shelby definia-se o corpo de prova junto com o amoldador, com dimensões aproximadas de 8,0 cm de altura e 3,75 cm de diâmetro. (Ver Figura 4.5). Após moldados os corpos de prova estes foram verificadas com um paquímetro de resolução de 0,01 mm. e o peso foi medido em uma balança com exatidão de 0,01 g. Massa, volume e teor de umidade também foram mensurados visando à determinação de índices físicos.

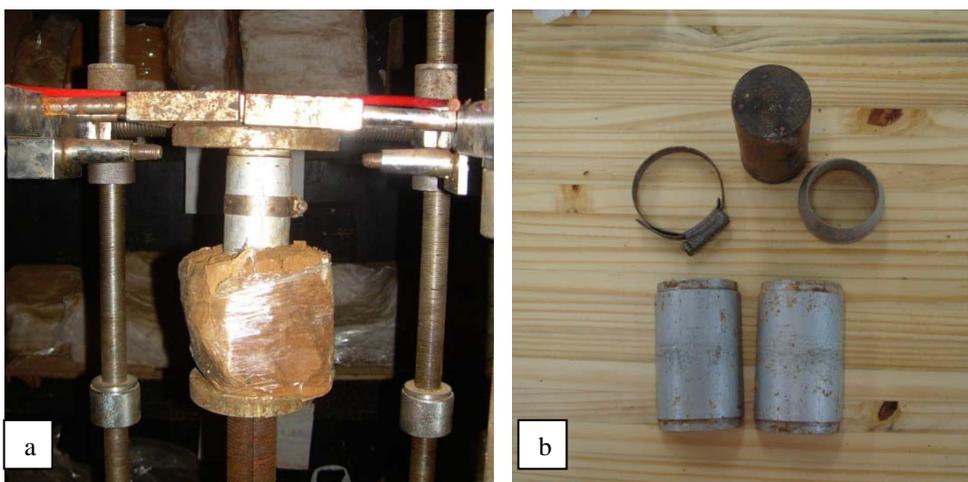


Figura 4.5: Moldagem do corpo de prova na prensa (a), amostrador utilizado na confecção dos corpos de prova (b).

4.4.2.2.

Saturação das linhas do Equipamento Triaxial

- Todas as linhas da base da célula e a do “*top cap*” eram testadas em relação a entupimentos e em seguida saturadas com água destilada para a eliminação de bolhas, este processo consistia em percolar água através das tubulações do equipamento triaxial.
- Verificava-se se o medidor de variação de volume continha água suficiente para a fase de saturação do corpo de prova.

4.4.2.3.

Montagem do ensaio

Separavam-se todos os itens necessários à montagem. As membranas eram devidamente testadas;

- O primeiro passo da montagem era posicionar uma pedra porosa e um papel filtro circular (mesmo diâmetro do corpo de prova) saturados sobre o pedestal;
- Colocava-se o corpo de prova sobre o papel filtro. No topo do corpo de prova, acrescentava-se novamente a combinação papel filtro e pedra porosa saturados;
- Com os corpos de prova devidamente posicionados e já envoltos pela membrana de látex de espessura de 0,03 mm, diâmetro de 50 mm e comprimento de 180 mm, presa por anéis de vedação (o-rings) era colocado o minitransdutor de poropressão.
- Especial cuidado se teve na colocação do minitransdutor de poropressão, com a ajuda de uma furadeira foi feito um furo no meio da membrana, no qual foi inserida a borracha e logo depois se colocou o minitransdutor;
- Para assegurar um íntimo contato entre o corpo de prova e o minitransdutor, colocava-se uma fina camada de kaolin na pedra porosa antes da instalação, o tempo de resposta não ia ver-se afetado devido a alta permeabilidade deste tipo de argila. (de Campos, 1984);
- Depois de inserir o minitransdutor dentro da borracha e empurrando para garantir o contato entre a pedra porosa e o corpo de prova, mas evitando uma

penetração nesta, colocava-se dois anéis O’rings ao redor da borracha para evitar algum vazamento.

- Finalmente, colocava-se três camadas de látex líquido cobrindo a borracha até o início do fio do minitransdutor, conferia-se que esteja seco o látex para evitar vazamento após, num mínimo de duas horas foi necessário para a instalação do minitrandutor;
- O restante da montagem seguiu a rotina convencional sugerida por Head (1986)

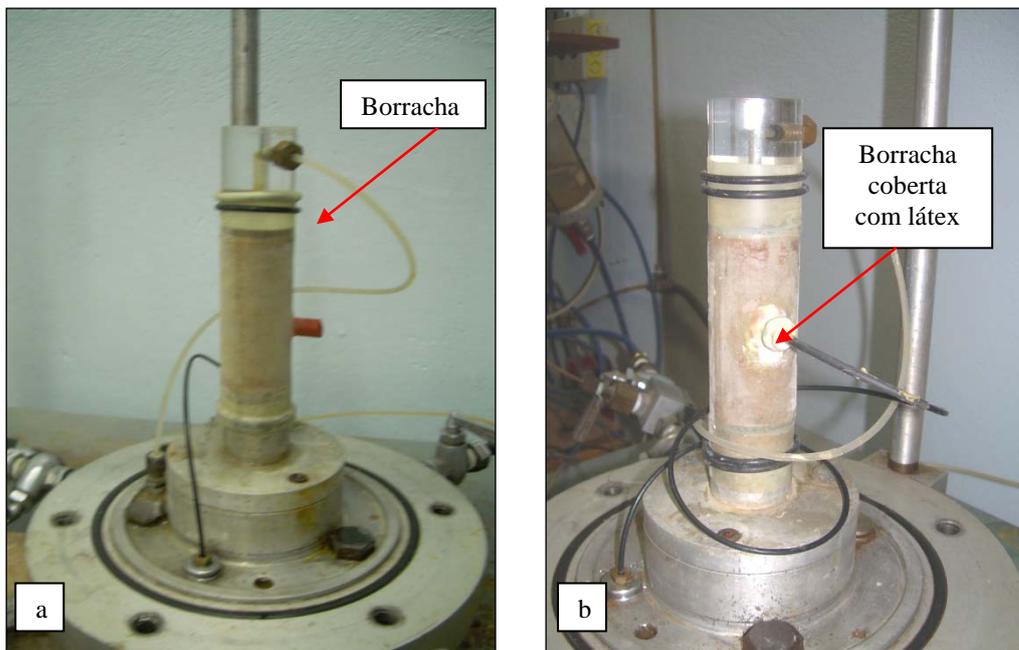


Figura 4.6: Montagem do corpo de prova (a), Montagem final com o minitransdutor e o látex líquido seco ao redor da borracha (b).

4.4.2.4.

Saturação dos corpos de prova

A fase de saturação foi feita por duas técnicas, de contrapressão e percolação; no início foram medidas as pressões no corpo de prova e na câmara triaxial, tendo-se cuidado que não seja maior esta última; assim iniciava-se a saturação por contrapressão.

Esta técnica, além de saturar o corpo de prova, dissolve bolhas de ar que possam existir entre a amostra e a membrana e nas linhas de contrapressão; aplicavam-se estágios de pressão simultâneos de 50 kPa, tanto na tensão de confinamento como na contra-pressão, sendo a tensão efetiva de confinamento mantida em 10 kPa. A contra-

pressão no sistema era aplicada na base e no topo do corpo de prova sendo a poropressão mediana na base do corpo de prova.

Seguia-se então a fase de percolação com a finalidade de saturar pela retirada de ar do corpo de prova, que tinha duração mínima de 4 horas cada estagio e era iniciada sob a carga hidráulica de 90 kPa de contra-pressão no topo e 97 kPa na base, com a aplicação de uma pressão confinante de 100 kPa resultando de uma tensão efetiva de confinamento de 10 kPa no topo e de 3 kPa na base, este tipo de percolação foi possível devido a rigidez no material. A pressão confinante era aplicada para evitar que houvesse fluxo d'água entre a membrana e o corpo de prova. O sentido de percolação da água nos corpos de prova era de baixo para cima, o gradiente gerado é desprezível para causar desestruturação ou amolgamento no corpo de prova. Esta fase era finalizada quando era percolado, no mínimo, o volume de água equivalente a duas vezes o volume de vazios do corpo de prova, conforme recomendado pela Norma BS 1377-90. A fase de percolação também é indicada por Laçasse & Berre (1998) e Baldi *et al.* (1998). Em um ensaio o corpo de prova foi pressionado até que o parâmetro B fosse igual ou superior a 0,95.

Para verificar se o grau de saturação era satisfatório, calculava-se o parâmetro B de Skempton, sendo:

$$B = \Delta u / \Delta \sigma_c \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Δu – Excesso de poropressão gerado

$\Delta \sigma_c$ – Acréscimo de tensão confinante aplicado

Para a verificação da saturação dos corpos de prova nos demais ensaios era analisada a variação volumétrica durante o último incremento de tensões totais: se a amostra está saturada não há variação de volume ao variar as tensões totais, mantendo-se a tensão efetiva constante. Esta técnica foi utilizada em detrimento da medição do parâmetro B para evitar danos à estruturas do solo indeformado. As pressões necessárias para garantir a saturação dos corpos de prova eram equivalentes a 550 kPa.

4.4.2.5.

Adensamento

Após a saturação, dava-se início à fase de adensamento. Era ajustada a tensão confinante e a contrapressão para a definição da tensão efetiva de confinamento do ensaio, mantendo-se a contrapressão mínima de 350 kPa, para evitar a desaturação dos corpos de prova, Head (1986)

Todos os adensamentos realizados foram isotrópicos. Adquiriam-se dados de variação de volume e deformações axiais ao longo de 24 horas, sendo possível a geração de gráficos simultaneamente ao ensaio na tela do computador, permitia-se determinar o final da fase de adensamento primário, o ensaio antes deste tempo mesmo quando constatado que não havia mais variação de volume não foi interrompendo.

Verificava-se que as pressões na base e no meio do corpo de prova (medido com o minitransdutor) sejam equalizadas. Figura 4.7

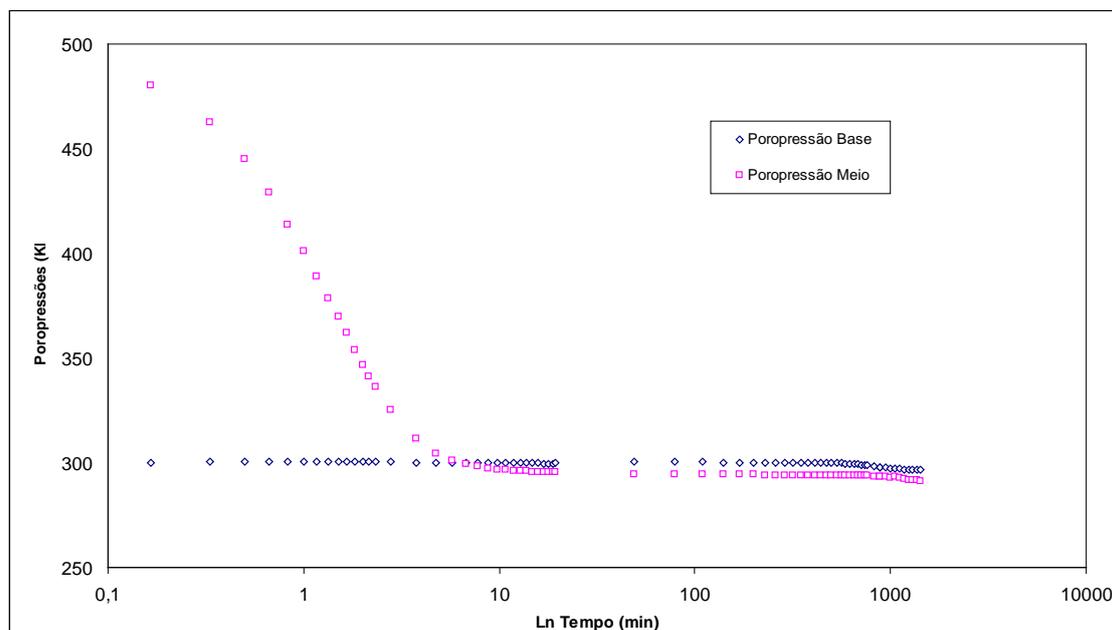


Figura 4.7: Exemplo da equalização das poropressões na base e no meio do corpo de prova, após de 24 horas de adensamento.

Já com os dados do ensaio, traçava-se o variação volumétrica (cm^3) versus raiz do tempo (min) ($\Delta V \times \sqrt{t}$). Conforme recomendações de Head (1986), prolongava-se o trecho retilíneo inicial até encontrar a horizontal correspondente ao trecho final (estabilização das variações volumétricas). O ponto de interseção fornecia a raiz de t_{100}

em minutos (Figura 4.8). O valor de t_{100} era usado para definir a velocidade de cisalhamento.

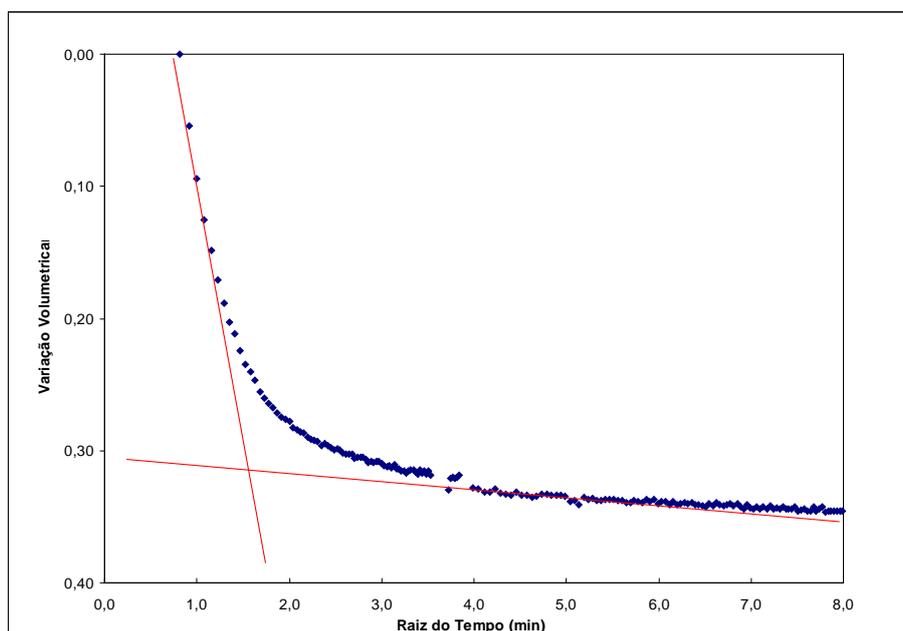


Figura 4.8 – Exemplo de gráfico utilizado no cálculo de t_{100} (ensaio triaxial CIU com σ'_c igual a 200kPa)

4.4.2.6.

Fase de cisalhamento

Logo após o término do adensamento, iniciava-se a fase de cisalhamento. Para a fase de cisalhamento, foram variadas as velocidades adotadas neste trabalho, considerou-se as metodologias propostas por Head (1986) na determinação do tempo de falha t_f .

A primeira metodologia foi a determinação a partir das curvas de variação volumétrica (cm^3) versus raiz do tempo (min) ($\Delta V \propto \sqrt{t}$), de acordo com as recomendações da Norma BS 1377 – 90. Segundo esta Norma, através desta curva determina-se o tempo de adensamento total (t_{100}) e com este valor calcula-se o (t_f) pela seguinte equação 1:

$$t_f = F \sqrt{t_{100}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: F é o coeficiente que depende das condições de drenagem e do tipo de ensaio triaxial.

O tempo requerido para a falha em ensaios não drenados, baseados na equalização do 95% das poropressões dentro do corpo de prova, foi mostrado por Blighht (1964) através de uma relação entre t_f e o coeficiente de adensamento C_v , dependendo das condições de drenagem radial, assim, para ensaios sem drenagem radial calcula-se pela seguinte equação:

$$t_f = 0.4 \frac{X L^2}{C_v} \quad \text{Equação 3}$$

Finalmente foi adotado o cálculo da velocidade de cisalhamento conforme equação empírica proposta por Head (1986):

$$V_{max} = \epsilon_{er} \times L / (100 \times tr) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

- V_{max} – Velocidade máxima de cisalhamento;
- L – Altura do corpo de prova em mm;
- ϵ_{er} – Deformação axial estimada na ruptura, em %;
- tr – Tempo mínimo de ruptura em minutos.

O valor de tr depende das condições de drenagem e do tipo de ensaio triaxial (CIU ou CID). O valor de tr para ensaios CIU sem drenagem radial é 0.51 vezes o valor de t_{100} . Head (1986) recomenda adotar um valor mínimo de tr igual a 120 minutos.

Nos ensaios não drenados, a compressão axial imposta deve ser suficientemente lenta de forma a permitir a equalização dos excessos de poropressão gerados ao longo da altura do corpo de prova. Todos os valores de tr obtidos foram menores que 120 minutos, por isso foi adotado $tr = 120$ minutos. Admitiu-se também que a ruptura ocorreria para uma deformação axial de 5 %.

Desta forma, a velocidade calculada foi de 0.033 mm/min.

Um dos objetivos desta pesquisa é analisar a resistência ao cisalhamento para diferentes índices de velocidades de cisalhamento, foram realizadas seis velocidades distintas, na tabela 4.1 apresenta-se as características de tempos e deformações axiais esperados nos ensaios, estas seis velocidades foram utilizadas para uma tensão confinante de 200 kPa, para tensões confinantes de 20 e 70 kPa, utilizou-se as velocidades de 0,0033, 0,0333 e 33,33.

Tabela 4.1 – Resumo das velocidades de cisalhamento utilizadas na pesquisa

| Velocidade (mm/min) | ϵ (%) | t (seg) | t (min) | t (horas) | t (dias) |
|------------------------|-------------------|------------|------------|--------------|-------------|
| 0.0033 | 18 % | 259200.0 | 4320.0 | 72.00 | 3.00 |
| 0.0333 | 18 % | 25920.0 | 432.00 | 7.20 | 0.30 |
| 0.333 | 18 % | 2592.0 | 43.20 | 0.72 | 0.03 |
| 0.667 | 18 % | 1296.0 | 21.60 | 0.36 | 0.02 |
| 3.333 | 18 % | 259.2 | 4.32 | 0.07 | 0.00 |
| 33.33 | 18 % | 25.92 | 0.43 | 0.01 | 0.00 |

Para os cálculos dos resultados dos ensaios de compressão triaxial foram utilizadas as correções de área apresentadas por Germaine & Ladd (1988), sendo também comparados com aquelas sugeridas anteriormente por Bishop & Henkel (1962), que serão discutidas no capítulo 6. Não foram aplicadas correções de tensão devidas à influência da membrana de látex, uma vez que, dada à resistência ao cisalhamento do solo estudado, o valor a ser corrigido é desprezível.

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).

Logo, construíram-se os gráficos das trajetórias de tensão (p' x q) de cada ensaio, a partir dos quais foram determinadas as envoltórias de ruptura e os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo. Também foram construídos os gráficos das curvas de tensão desviadora *versus* deformação axial (σ_d x ϵ_a) e de acréscimo de poropressão *versus* deformação axial (Δu x ϵ_a) para cada ensaio realizado.

4.5.

Ensaio de Adensamento com Deslocamento Controlado: CRD

Buscando técnicas mais apuradas e agilidade no processamento dos ensaios, desenvolveram-se ensaios de curta duração. Um dos ensaios propostos é o adensamento com velocidade controlada (CRD). A preferência por este ensaio se dá devido à simplicidade do mecanismo de transmissão de força ao corpo-de-prova, representado pela prensa mecânica com controle de velocidade de carregamento e comumente empregada em ensaios triaxiais (Carvalho *et al.*; 1993).

O ensaio de adensamento CRD foi desenvolvido com objetivo de contornar as limitações do ensaio convencional de adensamento: obtenção da curva.

O objetivo deste ensaio foi de se determinar o valor da tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) com mais rapidez e precisão; em um ensaio de CRS são obtidas as curvas *tensão versus deformação axial* ($\sigma \times \epsilon_a$). Os detalhes do ensaio CRS e a análise empregada na interpretação dos resultados são descritos em Znidarcic *et al.* (1986). (Pereira, 2006)

A principal incerteza relativa ao ensaio consiste na definição da velocidade a ser adotada, de particular influência nos resultados obtidos. A velocidade é um fator decisivo na qualidade dos resultados e existem inúmeras pesquisas abordando este tema. Segundo Carvalho *et al.* (1993), a velocidade teria seu limite superior determinado pela condição de que não seja violada a suposta distribuição parabólica para as tensões efetivas ao longo do corpo-de-prova. O limite inferior da velocidade relaciona-se com a necessidade da existência de um valor mínimo de pressão hidrostática na base que permita o cálculo de C_v e também pelo fato de que o ensaio não deve se estender por um período igual ou superior ao método convencional.

Do ensaio de CRD são obtidos os parâmetros C_c , C_r e C_s , referentes ao adensamento primário, e C_α referente ao adensamento secundário, o qual é atribuído à deformação visco-elástica do esqueleto sólido sob carregamento constante ao longo do tempo.

Os índices de compressão, recompressão e descompressão são as declividades da curva “ $e \times \sigma'_{vm}$ (esc. log)”, cada qual em um trecho deferente da curva. O índice de compressão está associado diretamente com a magnitude dos recalques.

4.5.1.

Equipamentos utilizados

A aplicação do carregamento é feita por uma prensa similar à prensa utilizada em ensaios triaxiais com deformação controlada, conforme mostra a Figura 4.9. Mantém-se, assim, o conceito do ensaio, que é impor ao corpo de prova uma taxa de deformação constante ao longo do tempo. Durante o ensaio são medidos os valores da tensão total aplicada no topo (σ_v), a poropressão na base (ub) e a variação da altura (Δh) do corpo de prova.

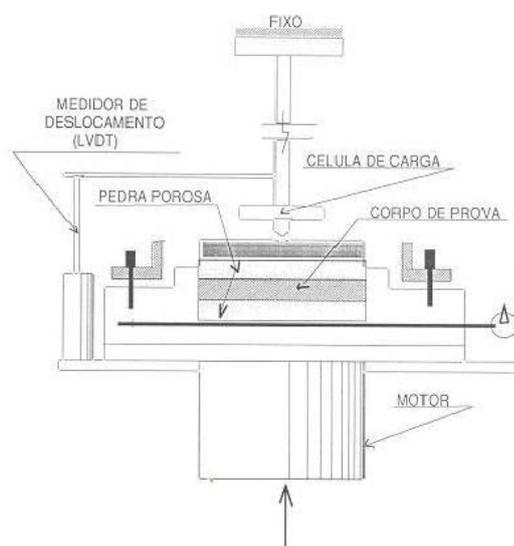


Figura 4.9: Equipamento de ensaio de adensamento CRD.

O equipamento utilizado na realização destes ensaios foi desenvolvido no laboratório de geotecnia da PUC-Rio (Ribeiro, 1992), a partir da adaptação de uma célula de adensamento convencional instalada em uma prensa de carregamento axial controlado. Um medidor de poropressão na base e um LSCT completam a instrumentação.

Hamilton & Crawford (1959) pesquisaram a influência da velocidade de deformação, concluindo que os parâmetros de compressibilidade, para uma dada estrutura de solo, variam consideravelmente com o tempo de execução do ensaio.

Smith & Wahls (1969) sugeriram que o valor da razão ub / σ_v deve ser sempre inferior a 50%, para garantir a uniformidade de tensão vertical efetiva ao longo do corpo de prova.

Para determinar a velocidade adequada a ser utilizada no ensaio, devem-se levar em consideração os seus objetivos, além das limitações teóricas para a análise dos resultados. Portanto, a velocidade deve atingir um determinado valor no qual a poropressão gerada na base atinja um valor mínimo para a obtenção de bons resultados de coeficientes de adensamento, definido pela eficácia das leituras do transdutor que mede as poropressões, e também um valor máximo no qual a relação tensão-deformação atinja um limite sem que os resultados possam ser questionáveis.

Há certa diversidade de critérios para a seleção da velocidade no ensaio CRS encontrados na literatura, como os propostos por: Smith & Wahls (1969), Wissa *et al.* (1971), Gorman *et al.* (1978) e Armour & Drnevich (1986).

Verifica-se que a maioria deles prescreve diretamente a velocidade com a razão ub/σ_v , entre a poropressão e a tensão vertical total, ou então associam essas duas condições.

4.5.2.

Procedimento adotado

4.5.2.1.

Confecção dos corpos de prova

Corpos de prova com diâmetro médio de 8,73cm e altura média de 2.00cm. Os corpos de prova foram obtidos a partir de amostras indeformadas. Procedimento similar ao do triaxial foi moldado por cravação lenta do amostrador, as dimensões aproximadas do corpo de prova são 8.0 cm de altura e 2.00 cm de diâmetro. (Figura 4.10).



Figura 4.10: Amostrador contendo o solo após de ser submetido a sucção e capilaridade para saturar-lo.

Após moldados os corpos de prova foram verificados com um paquímetro de resolução de 0.01 mm. e o peso foi obtido em uma balança com exatidão de 0.01 g. Massa, volume e teor de umidade também foram mensurados visando a determinação de índices físicos antes da saturação.

4.5.2.2.

Saturação dos Corpos de Prova: Capilaridade e Sucção

Inicialmente, tentou-se saturar os corpos de prova por capilaridade, gerando uma pressão negativa na água que preenche os meniscos, utilizou-se água destilada e deairada, deixando no dessecador fechado por 24 horas.

Alem disso, foi feita a aplicação de sucção nos corpos de prova, por 30 minutos e, após este procedimento o corpo de prova foi deixado no dessecador por 24 horas.

4.5.2.3.

Montagem do ensaio

Uma vez saturado o corpo de prova no dessecador, leva-se ao anel do molde, tirando o excesso de solo no topo até ficar do tamanho do molde, este procedimento foi feito com cuidado para não amolgar nem desestruturar o corpo de prova.

A seguir, é esquematizado o procedimento da montagem:

- Inicialmente, satura-se a pedra porosa da base do oedômetro (deixando percolar água através da mesma) e coloca-se papel filtro para evitar sua colmatção.
- A célula de adensamento foi montada, com as válvulas de drenagem abertas, a parte superior da célula contendo o corpo de prova instalada, evitando assim a formação de bolhas de ar. A célula de adensamento foi então posicionada na prensa para aplicação de carregamento uniaxial. Não foi permitida a drenagem da base, sendo instalado um transdutor de pressão.
- Após a conexão do sistema anel superior/pistão/ topo com o anel inferior do oedômetro, fecha-se o sistema com barras de latão para evitar vazamentos (deve-se colocar papel filtro sobre a pedra porosa da base do pistão).
- Seleciona-se a velocidade de ensaio desejada e inicia-se o mesmo

A Figura 4.11 mostra uma câmara de adensamento desmontada e outra montada. Pode-se perceber o anel sobre uma base com a pedra porosa coberta por papel filtro e duas válvulas de drenagem, uma para acoplar o transdutor e outra para saturação.

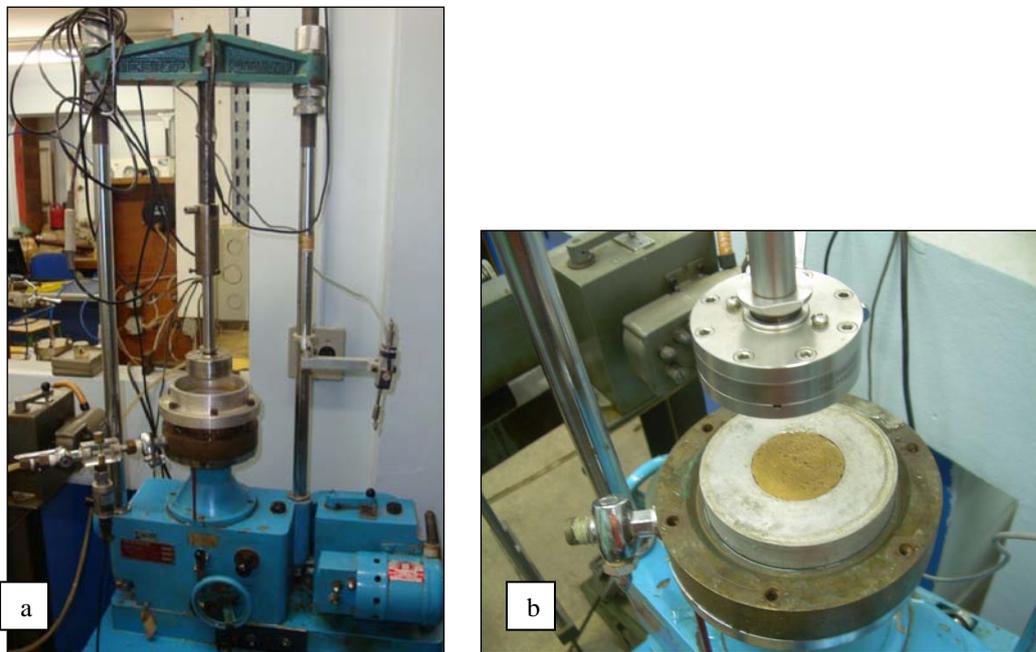


Figura 4.11: Equipamento de ensaio de adensamento CRD (a), corpo de prova colocado no anel (b).

À medida que o prato da prensa desloca-se para cima, o pistão comprime a amostra, provocando o seu adensamento.

A aquisição de dados foi feita com 3 instrumentos eletrônicos acoplados ao sistema do ensaio: um LSCDT (deslocamento vertical), uma célula da carga (força vertical) e um transdutor de pressão (poropressão na base). Todos os instrumentos encontravam-se ligados a um sistema de aquisição de dados com conversão analógica digital de 16 Bits (ORION). Desta forma, foi possível obter as leituras de maneira automatizada.

Previamente à realização dos ensaios, os instrumentos de medição de deslocamento (LSCDT), carga (célula de carga) e poropressão (transdutor) foram calibrados.