

5

ENSAIOS REALIZADOS E METODOLOGIAS EMPREGADAS

Com o intuito de se conhecer o comportamento de engenharia e caracterizar o solo estudado, um amplo programa experimental foi implementado no decorrer do presente trabalho.

A caracterização do solo teve início logo na abertura dos sherbies, onde foram observados a sua coloração e o cheiro característico. Posteriormente as amostras foram submetidas a ensaios de caracterização geotécnica e análises físico-químicas e mineralógicas. O programa experimental que engloba essas análises encontra-se resumido na Tabela 5.1, e as metodologias adotadas estão descritas no decorrer deste capítulo.

Com o objetivo de se conhecer melhor o depósito mole de Santa Cruz e auxiliar na busca de uma solução para os problemas de recalque da área, foram realizados e encontram-se apresentados e discutidos na presente dissertação ensaios que fornecem parâmetros hidráulicos e de compressibilidade desse solo. As análises de compressibilidade envolveram ensaios de adensamento edométrico convencionais e especiais. Com a finalidade de uma futura implementação de um modelo de comportamento do solo estudado, foram realizados ensaios de adensamento hidrostático e anisotrópico, bem como ensaios triaxiais de cisalhamento drenados e não drenados. A Tabela 5.2 resume o programa experimental envolvendo os ensaios de adensamento, e as metodologias utilizadas em cada um deles podem ser verificadas ao longo deste capítulo. Por fugirem do escopo da presente dissertação, os ensaios de cisalhamento triaxial efetuados, bem como as respectivas metodologias adotadas não são aqui detalhados.

Tabela 5.1 – Programa experimental dos ensaios de caracterização.

Caracterização físico-químico-mineralógica											
Shelby	Prof. (m)	Análise Granulométrica	Limites de Atterberg	Densidade Relativa dos Grãos	pH	Capacidade de Troca Catiônica	Ataque Sulfúrico	Teor de Sais	Condutividade Elétrica	Matéria Orgânica	Difração de Raios-X
AM-1	2,50 – 3,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
AM-1	3,50 – 4,00	X	X	X							
AM-1	5,25 – 5,75	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
AM-1	6,50 – 7,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
AM-2	3,50 – 4,00	X	X	X							X
AM-3	3,50 – 4,00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
AM-4	3,50 – 4,00	X	X	X							
AM-5	3,50 – 4,00	X	X	X						X	X
AM-6	3,50 – 4,00	X	X	X							
AM-7	3,50 – 4,00	X	X	X							
AM-8	3,50 – 4,00	X	X	X							
AM-9	3,50 – 4,00	X	X	X							
AM-11	3,50 – 4,00	X	X	X							
AM-12	3,50 – 4,00	X	X	X							
AM-13	3,50 – 4,00	X	X	X							
AM-14	3,50 – 4,00	X	X	X							
AM-15	3,50 – 4,00	X	X	X							

Tabela 5.2 – Programa experimental dos ensaios de adensamento.

Shelby	Prof. (m)	Adensamento Edométrico Convencional	Adensamento Edométrico com Medida de Creep	Adensamento Edométrico com Medida de Permeabilidade	Adensamento Hidrostático	Adensamento Anisotrópico
AM-1	2,50 – 3,00					
AM-1	3,50 – 4,00	X (I)	X (I)	X (I)	X (I)	
AM-1	5,25 – 5,75					
AM-1	6,50 – 7,00					
AM-2	3,50 – 4,00					
AM-3	3,50 – 4,00					X (I)
AM-4	3,50 – 4,00					X (I)
AM-5	3,50 – 4,00					X (I)
AM-6	3,50 – 4,00					X (I)
AM-7	3,50 – 4,00			X (I)		X (I)
AM-8	3,50 – 4,00					
AM-9	3,50 – 4,00					
AM-10	3,50 – 4,00					
AM-11	3,50 – 4,00					
AM-12	3,50 – 4,00					
AM-13	3,50 – 4,00					
AM-14	3,50 – 4,00	X (A)				
AM-15	3,50 – 4,00				X (I)	X (I)

Tipo de Amostra → (I) - Indeformada, (A) - Amolgada

5.1. Ensaio de Caracterização

5.1.1. Caracterização Física

A caracterização física do solo se dá através do conhecimento de suas propriedades índice, que podem ser determinadas por meio de ensaios padronizados no meio geotécnico.

Ensaio de granulometria por peneiramento e por sedimentação, limites de Atterberg e densidade relativa dos grãos foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio em amostras de todos os shelsbies, de acordo com as seguintes recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- NBR 7181/1984 → Solo – Análise Granulométrica;
- NBR 6459/1984 → Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180/1984 → Solo – Determinação do Limite de Plasticidade;
- NBR 6508/1984 → Massa Específica Real dos Grãos.

É importante ressaltar que as determinações dos limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) foram realizadas com o material em seu estado natural, ou seja, a partir da umidade natural do solo, sem secagem prévia, como prevê as NBR 7159 e NBR 7180. Este procedimento foi adotado atendendo recomendações de Bjerrum (1973) e Bogossiam & Lima (1974) entre outros. Estes últimos autores estudaram a influência das metodologias dos ensaios na determinação dos limites de liquidez e de plasticidade em um solo da área do Porto de Santa Cruz-RJ, e constataram que os solos argilosos orgânicos do local apresentaram valores de limites de liquidez discrepantes quando ensaiados com amostras previamente secas e a partir da umidade natural. Essas análises indicaram que os ensaios executados de acordo com a metodologia clássica proposta pela ABNT (amostras com secagem prévia ao ar) apresentaram valores de limite de liquidez inferiores ao teor de umidade natural e incompatíveis com a consistência do solo, enquanto que os ensaios realizados com o solo sem secagem prévia apresentaram valores próximos ou superiores ao teor de umidade natural, mais coerente com o esperado. Entretanto a mesma tendência não foi observada para as determinações do limite de plasticidade, que se apresentaram próximas para as diferentes metodologias.

As determinações do peso específico natural (γ_t) e da umidade natural (w_0) do solo argiloso foram realizadas a partir da moldagem de corpos de prova para os ensaios envolvendo amostras indeformadas. O peso específico foi determinado pela diferença de peso entre o “berço” com solo e sem solo, dividido pelo volume do molde. Já a umidade era determinada das aparas do solo que restavam do processo de talhagem dos corpos de provas. Estas eram colocadas na estufa a 110°C por 24 horas. Esses índices foram adquiridos seguindo as seguintes recomendações da ABNT:

- NBR 6457/1986 → Teor de Umidade Natural
- NBR 2887/1988 → Massa Específica Natural

Para o aterro, o peso específico natural (γ_t) foi determinado cravando-se um anel de peso e volume conhecidos no bloco amostrado, e a umidade natural (w_0) foi obtida diretamente do solo retirado do interior do bloco.

Os demais índices como o peso específico seco (γ_d), o índice de vazios (e) e o grau de saturação (S), foram obtidos a partir de relações entre os índices existentes na literatura corrente de Mecânica dos Solos.

Outros parâmetros que auxiliam a identificação e classificação dos solos moles são o índice de plasticidade (IP) e o índice de atividade de Skempton (IA). O índice de plasticidade é obtido pela diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade, indicando a faixa de valores em que o solo se apresenta plástico. O índice de atividade é definido pela relação:

$$IA = \frac{\text{Índice de Plasticidade (IP)}}{\% < 2\mu\text{m}}, \text{ onde a } \% < 2\mu\text{m} \text{ corresponde à fração}$$

argila do solo.

De acordo com a classificação de Skempton, a atividade dos solos pode ser definida conforme especificado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Classificação da atividade de solos segundo Skempton

Classificação	IA
Inativo	<0,75
Atividade Normal	0,75<IA<1,25
Ativo	>1,25

5.1.2. Caracterização Mineralógica

A identificação dos argilominerais constituintes dos solos moles é de extrema importância para o entendimento do seu comportamento. Um dos ensaios que auxilia a identificação da composição mineralógica da fração silte/argila é a Difração de Raio X. Este ensaio consiste em incidir um feixe monocromático de Raios-X na amostra de solo e registrar o seu ângulo de reflexão. Cada argilomineral gera um conjunto característico de reflexões segundo ângulos θ , que podem ser convertidos nas distâncias interplanares formadas pelas estruturas cristalinas.

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 2° a 30° .

Primeiramente foram realizados ensaios pelo método do pó. Neste caso, o solo foi previamente seco em estufa com temperatura inferior a 60°C , até adquirir constância de massa, e destorroado. Posteriormente foram separadas as frações do solo passantes nas peneiras #40, #200 e #400 e enviadas ao DCMM para serem ensaiadas. Entretanto, o resultado obtido não foi coerente com as análises químicas do presente trabalho, nem com os dados existentes na literatura para o tipo e a região do solo estudado. Neste caso, optou-se pela realização de análises em lâmina, com o objetivo de avaliar a possível presença de um argilomineral do tipo 2:1.

Para esses ensaios, o solo também foi seco em estufa com temperatura de aproximadamente 60°C , destorroado e separado pela peneira #400. Com esse material, preparou-se uma suspensão em água, que com o auxílio de uma pipeta foi colocada em três lâminas e deixadas secar naturalmente para a orientação preferencial das partículas. Após a secagem, duas delas foram “tratadas” antes de serem enviadas para o DCMM. Uma foi aquecida por 3 horas a 550°C , para eliminar por aquecimento os argilominerais do tipo 1:1, facilitando a identificação dos do tipo 2:1, e a outra, denominada de lâmina glicolada, foi deixada em um dessecador para ser saturada com etilenoglicol por 24 horas.

5.1.3. Caracterização Físico-Química

As análises físico-químicas permitem uma avaliação da composição mineralógica e de propriedades físico-químicas das argilas, complementando, desse modo, a identificação e caracterização dos solos.

Estas análises foram realizadas no Centro Nacional de Pesquisas de Solos CNPS/EMBRAPA, seguindo as metodologias propostas no Manual de Métodos de Análise de Solo (CNPS/EMBRAPA, 1997). O programa envolvendo esses ensaios consistiu na execução de:

- pH em água e em KCl
- Complexo sortivo
- Ataque sulfúrico
- Condutividade elétrica
- Teor de sais

As análises foram executadas na fração fina (material passante na peneira de #40) de amostras de diferentes profundidades, visando caracterizar o perfil do depósito mole.

5.1.4. Determinação de Matéria Orgânica

O teor de matéria orgânica pode ser determinado indiretamente por meio da seguinte correlação:

$$M.O.(%) = 1,724.C,$$

onde C, em %, é o carbono orgânico obtido por meio de análise química. No presente trabalho, essa análise foi realizada no Centro Nacional de Pesquisas de Solos CNPS/EMBRAPA, seguindo a metodologia proposta no Manual de Métodos de Análise de Solo (CNPS/EMBRAPA, 1997), com o solo passante na peneira de malha #40.

Outro procedimento utilizado para a determinação da matéria orgânica é o de perda por aquecimento (PPA), que consiste em colocar o solo em uma mufla, para que toda a matéria orgânica seja queimada, e calculada pela diferença de peso do solo antes e depois de ser aquecido.

Para tanto, o solo foi destorroado e colocado na estufa a 110 °C por 24 horas, para a retirada de toda a sua umidade, para posteriormente ser colocado na mufla e queimar a matéria orgânica. Cada análise foi realizada em 3 amostras para se obter uma média dos resultados.

Primeiramente o solo foi colocado na mufla por um período de 2 horas a 600°C, e de 4 horas a 400°C. Entretanto os resultados mostraram-se bastante dispersos e diferentes dos valores determinados pelo teor de carbono total e dos encontrados na literatura para o tipo de solo em estudo. Assim sendo, foram realizadas novas análises, com o solo exposto a diferentes temperaturas e tempos na mufla, visando avaliar o efeito da temperatura e tempo de exposição do solo ao calor na quantificação do teor de matéria orgânica por PPA. A Tabela 5.4 abaixo especifica as temperaturas e o tempo que as amostras foram submetidas ao calor.

Tabela 5.4 –Análises realizadas para a determinação do teor de matéria orgânica.

	Temperatura (°C)	Tempo (horas)
Primeira análise	400	4
	600	2
Segunda análise	300	4
	450	4
	500	4
	600	4

5.2. Ensaio de Adensamento Edométrico

O adensamento unidimensional é reproduzido no laboratório pelo ensaio edométrico. O corpo de prova é confinado lateralmente por um anel metálico rígido, limitando desse modo as deformações e o fluxo à direção vertical. No ensaio denominado convencional, são aplicados incrementos de carga vertical no corpo de prova, e registradas as deformações a diversos intervalos de tempo para cada estágio de carga.

Os ensaios de adensamento edométrico foram executados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio em prensas do tipo Bishop, conforme mostram as Figuras 5.1 e 5.2. Nessas prensas, a carga axial é transmitida ao corpo de prova por pesos previamente calibrados, através de um braço de

alavancas com vantagem mecânica 10:1, e o registro das variações de altura, é feito por meio de um extensômetro com resolução de 0,01 mm.

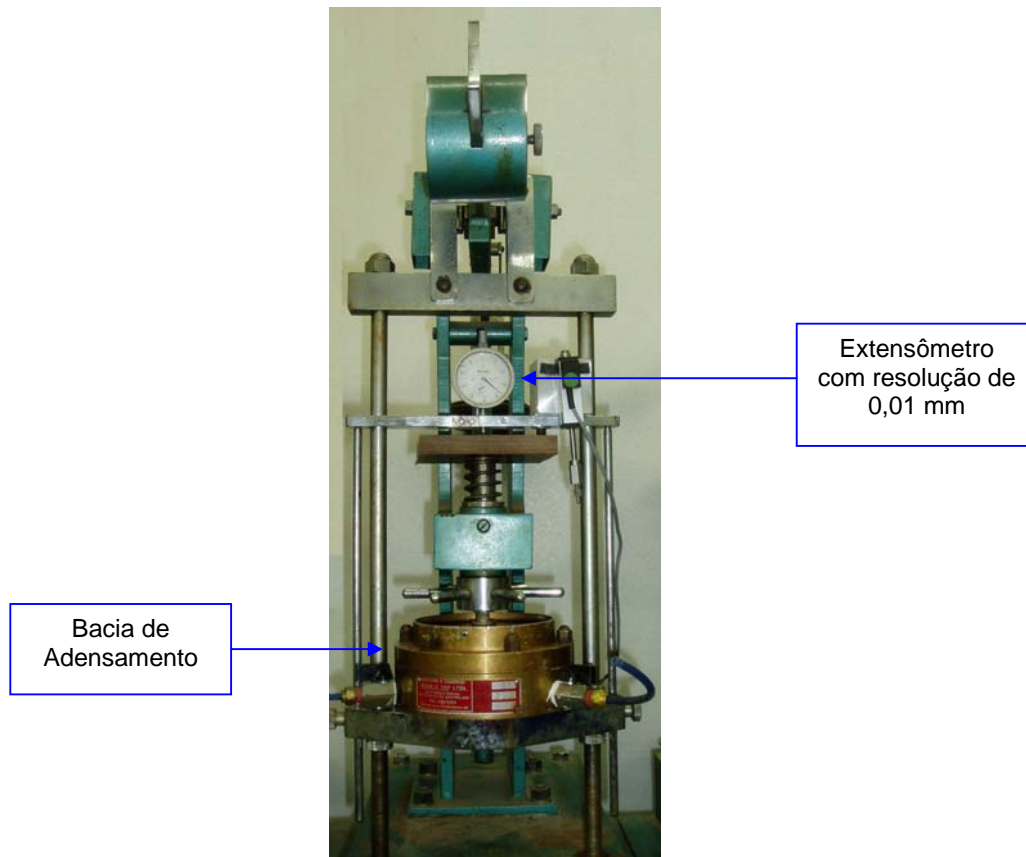


Figura 5.1 - Prensa de adensamento tipo Bishop do LGMA da PUC-Rio.

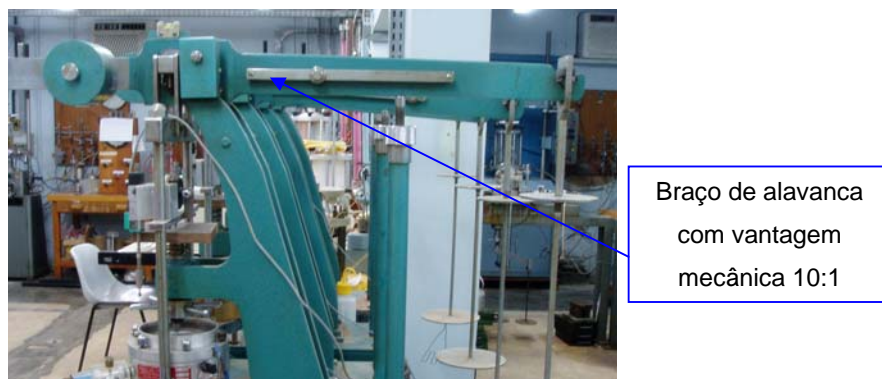


Figura 5.2 – Prensa de adensamento tipo Bishop do LGMA da PUC-Rio.

Além do ensaio convencional, foram executados ensaios especiais com o objetivo de analisar a compressão secundária e a permeabilidade do depósito estudado. Esses ensaios têm o mesmo princípio do denominado convencional,

porém com algumas adaptações, que serão explicitadas na descrição de cada um deles.

O procedimento comum à montagem dos ensaios de adensamento edométricos está descrito a seguir:

a) Confeção dos corpos de prova

Todos os corpos de prova foram moldados com dimensões de 19,8 mm de altura e 71,5 mm de diâmetro, em amostras retiradas da profundidade de 3,5 a 4,0 metros.

Os corpos de prova indeformados foram moldados a partir de amostras extraídas dos shelbies segundo o procedimento sugerido por Ladd & DeGroot (2004), descrito no capítulo 4 da presente dissertação.

Na preparação dos corpos de prova amolgados, o solo foi primeiramente desestruturado e homogeneizado com a mão. Posteriormente adicionou-se água, de modo que a umidade inicial do ensaio fosse de aproximadamente 1,5.LL. Usou-se este valor, admitindo-se que deste modo os corpos de prova estariam saturados. A amostra era então moldada, e deixada na prensa de adensamento em repouso por 24 horas sem nenhuma carga atuando sobre ela.

b) Montagem dos ensaios

A montagem dos ensaios seguiu as recomendações da ABNT, de acordo com a norma MB-3336 (Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional).

Antes de iniciar o primeiro estágio de carregamento, a bacia do edômetro era preenchida com água destilada e mantida cheia até o final do último descarregamento. Toda a água foi retirada da bacia antes de se iniciar o processo de desmontagem do edômetro para a determinação da umidade final, levando-se o corpo de prova integral à estufa.

5.2.1. Ensaio de Adensamento Edométrico Convencional

Foram realizados os ensaios denominados de AEI-1, AEA-1 e AEA-2, sendo que no primeiro, o corpo de prova era indeformado, enquanto que nos demais era amolgado.

Para o ensaio AEI-1 as pressões verticais totais nominais de carregamento e descarregamento utilizadas foram de: 10, 20, 40, 80, 150, 300, 450, 300, 150, 80, 40, 20, 10, 20, 40, 80, 150, 300, 500, 700, 950, 500, 300, 150, 40, e 10 kPa. As pressões foram mantidas constantes por um período de 24 horas nos estágios de carregamento e, nos de descarregamento, até a estabilização das leituras.

Nos ensaios AEA-1 e AEA-2 as pressões verticais nominais foram de: 10, 20, 40, 80, 120, 240, 480, 960, 1.200, 600, 300, 120, 80, 40 e 20kPa, sendo que os carregamentos foram de aproximadamente 24 horas e as pressões nos descarregamentos mantidas até estabilização dos deslocamentos verticais.

5.2.2. Ensaio de Adensamento Edométrico com Medida de Creep

Este ensaio foi realizado com o objetivo de verificar a influência do tempo de carregamento no solo estudado. Para isso, o ensaio AEI-2 foi executado do mesmo modo que o convencional AEI-1, porém, nos estágios de carregamento as pressões foram mantidas constantes por um período mínimo de 72 horas, e não de 24 horas.

As pressões verticais nominais de carregamento e descarregamento utilizadas foram de: 10, 20, 40, 80, 150, 300, 450, 300, 150, 80, 40, 20, 10, 20, 40, 80, 150, 300, 500, 700, 950, 500, 300, 150, 40, e 10 kPa.

5.2.3. Ensaio de Adensamento Edométrico com Medida de Permeabilidade

Esses ensaios têm o objetivo de medir a permeabilidade do solo quando este está submetido a uma determinada tensão efetiva. Para atender esse objetivo, foram realizados dois ensaios, denominados de AEI-3 e AEI-4, conforme especificado na Tabela 5.2.

Os ensaios de permeabilidade foram realizados ao final de determinados estágios de carregamento e eram do tipo carga variável, com fluxo de água vertical e ascendente. Para possibilitar as determinações da permeabilidade no corpo de prova, uma bureta graduada com resolução de $0,05 \text{ cm}^3$ foi acoplada ao sistema de drenagem, e cuidados foram tomados para se evitar a evaporação de água na bureta durante a evolução do ensaio. As Figuras 5.3 e 5.4 ilustram, respectivamente, a adaptação na prensa de adensamento para a realização dos ensaios de permeabilidade e o sistema de vedação para evitar a evaporação da água, feito com uma borracha presa à bureta com o auxílio de um elástico.

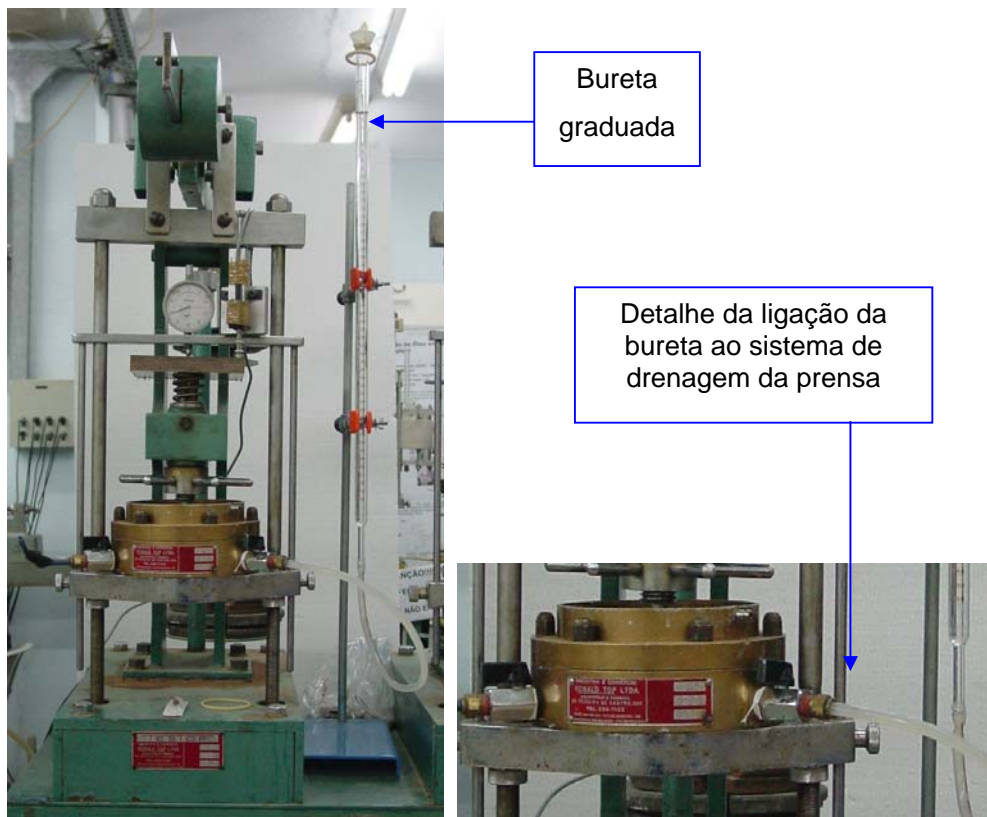


Figura 5.3 – Adaptação realizada na prensa de adensamento para a realização dos ensaios de permeabilidade.

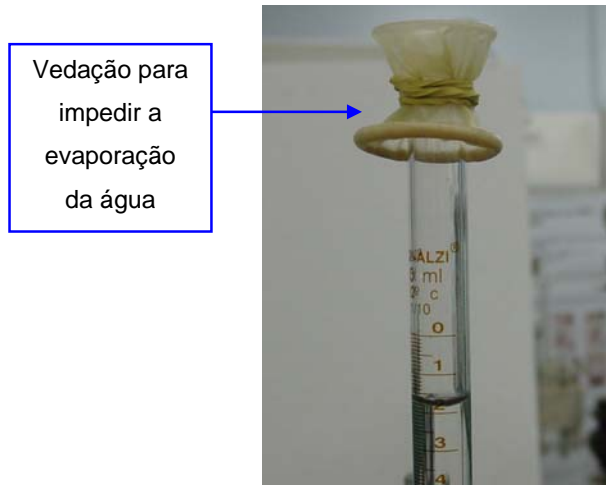


Figura 5.4 – Detalhe da vedação utilizada para impedir a evaporação da água durante os ensaios de permeabilidade.

Para o ensaio AEI-3 as pressões verticais totais nominais de carregamento e descarregamento utilizadas foram de: 10, 20, 40, 80, 150, 300, 450, 300, 150, 80, 40, 20, 10, 20, 40, 80, 150, 300, 500, 700, 950, 500, 300, 150, 40, e 10 kPa. Nos estágios de carregamento as pressões foram mantidas constantes por um período de 24 horas, e nos estágios de descarregamento até que as leituras se estabilizassem. As medidas de permeabilidade foram realizadas ao final dos estágios de 20, 80, 300 e 950 kPa. A carga de pressão aplicada na base do corpo de prova foi de 58,32 cm e as leituras de variação do volume foram feitas em um período de aproximadamente 24 horas.

Já para o ensaio AEI-4, as pressões verticais nominais totais de carregamento e descarregamento foram de: 10, 20, 40, 80, 150, 300, 450, 200, 100, 50, 10, 50, 100, 300, 500, 700, 950, 500, 300, 150, 40, e 10 kPa. Neste caso, os estágios de carregamento e de descarregamento foram encerrados quando a taxa de variação de altura do corpo de prova ficava constante no tempo, em geral por um período maior do que 36 horas para o carregamento, e aproximadamente 24 horas para o descarregamento. O ensaio de permeabilidade foi executado ao final dos estágios de 20, 80, 150, 500, 700, 950 kPa. Para este ensaio, a carga de pressão aplicada na base do corpo de prova foi de 68,50 cm e as leituras de variação do volume também foram realizadas em períodos de aproximadamente 24 horas.

5.3.

Ensaio de Adensamento Hidrostático

Os ensaios de adensamento hidrostático têm como principal objetivo contribuir para a elaboração de um modelo de comportamento do depósito mole estudado. Para atender tal objetivo, foram realizados dois ensaios, denominados de AI-1 e AI-2.

5.3.1.

Equipamento Utilizado

Os ensaios de adensamento hidrostático foram realizados em prensas triaxiais da marca Wykeham-Ferrance do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, que se encontram ilustradas na Figura 5.5.

As células triaxiais utilizadas foram montadas para se trabalhar com corpos de prova de 1,5" de diâmetro e 3" de altura. Elas possuem uma câmara de acrílico que suporta uma pressão confinante máxima de 1000 kPa.

O sistema de aplicação de pressão na câmara é de ar comprimido, controlado por um painel de válvulas reguladoras de pressão de precisão da Bellofram (precisão da ordem de 1kPa a partir de cerca de 7kPa).

Transdutores de pressões com resolução de 0,5 kPa (precisão de 1kPa) e capacidade máxima de 1000 kPa foram empregados para controlar e medir, respectivamente, as pressões confinantes aplicadas e poro-pressões resultantes.

Transdutores de variação de volume do tipo Imperial College foram utilizados nas medidas de variação de volume de água entrando ou saindo das amostras, com uma precisão de cerca de 0,05 cm³.

A obtenção dos registros dos ensaios foi realizada de maneira automatizada, por meio do sistema central de aquisição de dados do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente. (Sistema Orion SI353ID da Schlumberger).

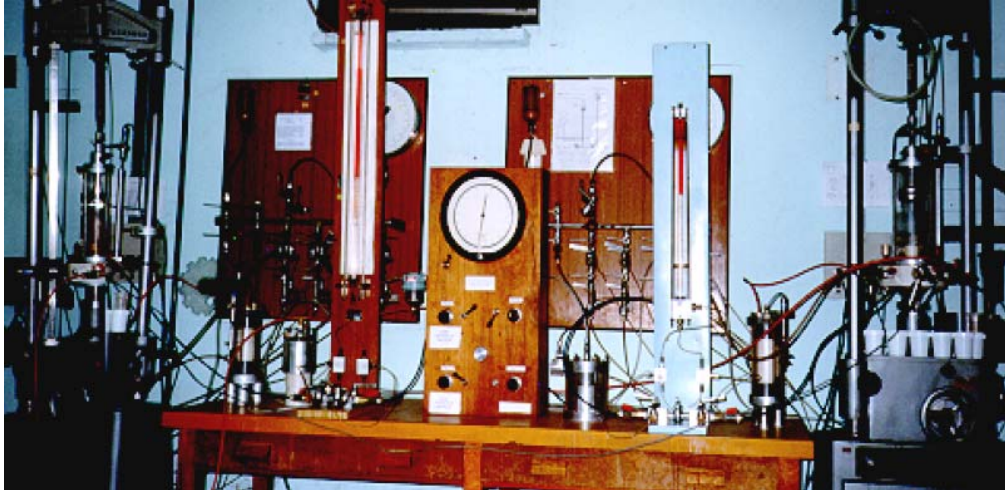


Figura 5.5 – Equipamento triaxial utilizado nos ensaios de adensamento hidrostático

5.3.2. Metodologia dos Ensaios

Neste item serão descritos todos os procedimentos realizados para a execução dos ensaios de adensamento hidrostático.

a) *Confecção dos corpos de prova*

Todos os corpos de prova foram moldados a partir de amostras da profundidade de 3,50 a 4,00 metros. Primeiramente, seguiu-se o procedimento de extração do solo do shelby sugerido por Ladd & DeGroot (2002), descrito no capítulo 4. A amostra era, então, levada ao pedestal de moldagem e cuidadosamente esculpida formando corpos de prova com dimensões de 78,2 mm de altura e 38,2 mm de diâmetro. Posteriormente era colocada no berço para aparo de topo e base, pesada e em seguida levada à prensa triaxial para a montagem do ensaio. Cuidados para se evitar qualquer perturbação no corpo de prova e perda de umidade foram rotineiramente tomados.

b) *Membranas, papel filtro e pedras porosas*

As membranas utilizadas eram de látex, fornecidas pela Wikeham Farrance.. Elas foram testadas para a verificação da ausência de furos antes da execução de todos os ensaios.

O papel filtro utilizado era da marca *Whatman* n° 54. No primeiro ensaio, utilizou-se o papel filtro somente na base e no topo das amostras. Posteriormente, para o ensaio AI-2, verificou-se a necessidade de utilizá-los também ao redor do

corpo de prova, para acelerar o processo de dissipação de poropressão, de acordo com Bishop & Henkel (1962). Desse modo eles foram cortados conforme ilustrado na Figura 5.6. Tanto o papel filtro usado na base e no topo, quanto o dreno radial eram colocados em contato com água, para saturarem, antes da montagem dos ensaios.

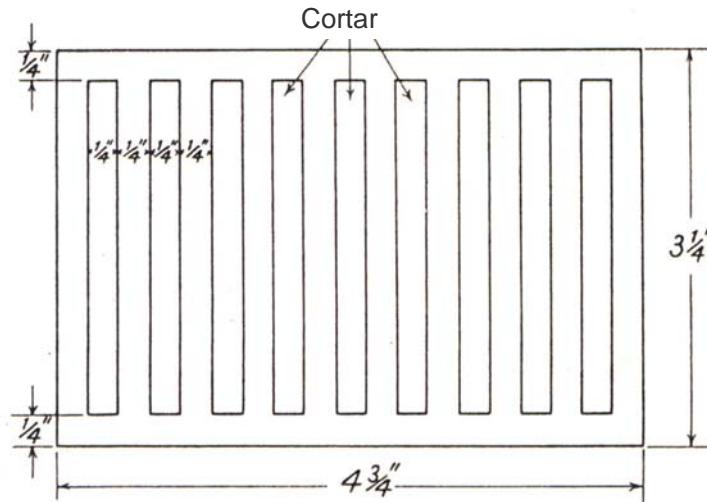


Figura 5.6 – Molde para cortar o dreno lateral (Bishop & Henkel, 1962)

As pedras porosas eram previamente 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.

c) *Saturação das linhas*

Todas as linhas da base da célula e a do *top cap* eram saturadas antes de se colocar o corpo de prova na prensa. Este processo consistia em percolar água, aplicando pressão, para a retirada de qualquer bolha de ar que pudesse estar presente nas linhas.

d) *Montagem dos ensaios*

Após a saturação das linhas, colocava-se a amostra no pedestal da célula triaxial, seguindo a seguinte seqüência: pedra porosa e papel filtro de base, corpo de prova, papel filtro e pedra porosa de topo. Em seguida, cuidadosamente envolvia-se o corpo de prova com o dreno lateral, tendo sempre a preocupação de deixá-lo em contato com as pedras porosas situadas no topo

e na base. Por fim, inseria-se a membrana no corpo de prova e colocava-se o *top cap* no topo do conjunto, conforme ilustra a Figura 5.7. A câmara de acrílico era então montada e preenchida com água.



Figura 5.7 - Montagem do corpo de prova na prensa triaxial

No ensaio AI-1 aplicou-se a seguinte seqüência de pressões confinantes efetivas: 10, 20, 40, 80, 150, 300, 450, 500, 700, 950 kPa. Já para o ensaio AI-2 as pressões confinantes efetivas foram de: 10, 20, 40, 80, 150, 300, 450, 500, 600.

5.4. Ensaio de Adensamento Anisotrópico

Os ensaios triaxiais com adensamento anisotrópico têm o objetivo de, juntamente com os resultados dos demais ensaios, contribuir para a elaboração de um modelo do comportamento do depósito mole estudo.

Nesses ensaios o corpo de prova era adensado com relações $\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$ constantes, controladas ao longo do ensaio. O programa experimental está descrito na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Programa Experimental dos ensaios de Adensamento Anisotrópico

Amostra	Relação $K = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$
AM-3	K=1,0
AM-6	K=1,0
AM-3	K=0,9
AM-4	K=0,8
AM-15	K=0,8
AM-4	K=0,7
AM-7	K=0,6
AM-5	K=0,5
AM-15	K=0,5

5.4.1. Equipamento Utilizado

A execução desses ensaios ocorreu no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, em um equipamento triaxial tipo Bishop-Wesley, desenvolvido pelo Imperial College, Londres, que está ilustrado na Figura 5.8.

Este equipamento permite que os ensaios sejam realizados tanto com deformação controlada como com pressão controlada. Todas as informações constantes no item 5.3.1 referentes à câmara triaxial, aplicação de pressões confinantes e transdutores de pressão e variação de volume se aplicam a este equipamento, que conta ainda com:

- Célula de carga com capacidade máxima de 5kN e precisão melhor que 0,1N;
- Transdutor de deslocamento axial (externo à célula) com resolução infinita e precisão melhor que 50 μ m.



Figura 5.8 – Equipamento triaxial utilizado nos ensaios de adensamento anisotrópico

O equipamento está vinculado ao programa TRIAX, desenvolvido pela *School of Engineering and Computer Science* da Universidade de Durham, que permite:

- 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, por meio de gráficos visualizados no monitor, como mostra a Figura 5.9.

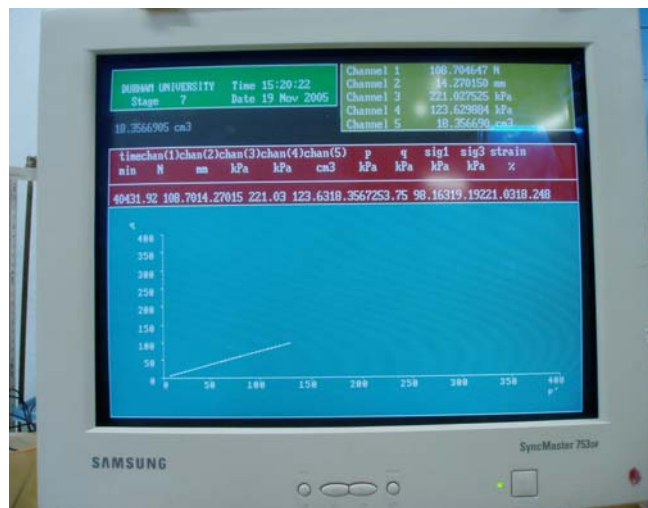


Figura 5.9 – Monitoramento dos ensaios por meio de gráficos

As pressões aplicadas são suprimidas por um compressor operando com pressão máxima de 800kPa. A pressão de ar fornecida pelo compressor é aplicada ao corpo de prova como pressão hidráulica, através de um sistema de interface ar-água. As pressões são controladas por três motores de passo (Figura 5.10), que estão acoplados a válvulas reguladoras de pressão, permitindo o controle total do equipamento pelo computador, através do programa TRIAX.

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

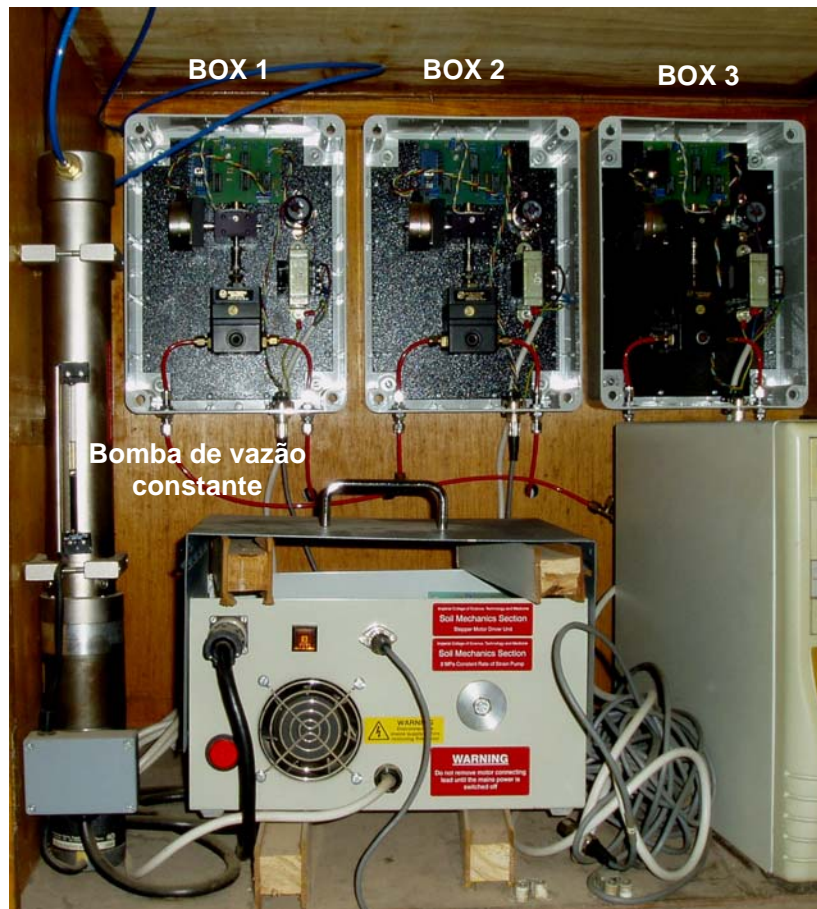


Figura 5.10 – Motores de passo do equipamento triaxial

É importante destacar que o equipamento utilizado possui a limitação de aplicação de 500 kPa de pressão confinante. Tentativas de se procurar contornar tal limitação foram infrutíferas por ser a mesma parte integrante do software de

controle disponível para a execução dos estudos constantes no presente trabalho.

5.4.2. Metodologia dos Ensaio

Neste item serão descritos todos os procedimentos realizados para a execução dos ensaios de adensamento anisotrópicos.

a) Confeção dos corpos de prova

Seguiu-se o mesmo procedimento adotado para o ensaio de adensamento hidrostático.

b) Membranas, papel filtro e pedras porosas

Seguiu-se o mesmo procedimento adotado para o ensaio de adensamento hidrostático.

c) Saturação das linhas

Seguiu-se o mesmo procedimento adotado para o ensaio de adensamento hidrostático.

d) Montagem dos ensaios

Seguiu-se o mesmo procedimento adotado para o ensaio de adensamento hidrostático.

e) Controle dos ensaios

Conforme dito anteriormente o sistema de aplicação de pressão ao equipamento está associado a três motores de passo e a uma bomba. Cada um deles corresponde a um BOX, conforme mostra a Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Identificação dos motores de passo

BOX	Pressão controlada
BOX 1	Contra-pressão
BOX 2	Pressão Confinante
BOX 3	RAM – Ensaio com tensão controlada
BOX 4	Bomba – Ensaio com deformação controlada

Os ensaios foram continuamente controlados pelo programa Triax que está vinculado ao equipamento. Antes do início de cada fase dos ensaios, uma tabela, semelhante a da Figura 5.8, era preenchida. Nela se estabelecia o *status* do Box que seria utilizado (ON/OFF), a variável ou a equação que seria controlada em cada BOX, assim como o valor que deveria ser mantido. O incremento corresponde à velocidade de execução dos ensaios e, o “alarm”, à condição de encerramento do ensaio.

ESTÁGIO:				
DESCRIÇÃO DO ESTÁGIO:				
DATA:				

BOX	1	BACK	2	CELL	3	RAM	4	RSP
STATUS								
CONTROL EQUATION								
HOLD VALUE								
TOLERANCE								
INCREMENT								
MAXIMUM PULSES								

	CONDITION	ACTION
ALARM 1		
ALARM 2		
ALARM 3		

Figura 5.11 – Tabela controle dos ensaios

f) Definição da velocidade dos ensaios

Para a determinação da velocidade do ensaio de adensamento foram realizados quatro ensaios piloto com velocidades de incremento de tensão de 5, 10, 15 e 20kPa/h. Os seus resultados foram comparados com o do ensaio de adensamento hidrostático AI-1, e chegou-se a conclusão de que a velocidade adotada para a fase de adensamento seria a de 5kPa/h. Esses dados encontram-se no Apêndice I.

g) Execução do Ensaio

O ensaio de adensamento anisotrópico pode ser dividido em 3 fases:

- Fase 1 - Saturação do corpo de prova
- Fase 2 – Ensaio com p' constante
- Fase 3 – Ensaio de adensamento com K constante

Cada uma dessas etapas está descrita a seguir:

- Fase 1 – Saturação do corpo de prova

A saturação do corpo de prova foi feita por aumento de contra-pressão, com drenagem pelo topo e base do corpo de provas.

A saturação foi verificada pelo parâmetro B de Skempton ($\Delta u/\Delta\sigma_c$), que deve estar próximo de 1. Neste trabalho, considerou-se o solo saturado com valores de B a partir de 0,98.

- Fase 2 – Ensaio com p' constante

Após a fase de saturação, o corpo de prova era submetido a um carregamento

com p' constante, sendo $p' = \frac{\sigma'_v + 2\sigma'_h}{3}$, com o objetivo de se chegar à relação

$K = \sigma'_h / \sigma'_v$ desejada, a partir de uma condição inicial de tensões efetivas variando entre 5 e 10kPa, para então dar início ao adensamento anisotrópico.

Esta fase era realizada com tensão controlada, a uma velocidade de incremento de tensão de 1 kPa/h, e sua duração era de menos de 24 horas, entretanto variada para cada relação K.

- Fase 3 – Ensaio de adensamento com K constante

A fase de adensamento também é realizada com tensão controlada, para

permitir que o programa controle e mantenha constante a relação $K = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$.

Neste caso, a poropressão era mantida constante, enquanto que a pressão confinante e a desviadora variavam.

Os ensaios foram encerrados quando atingiam um $s' = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2}$ de

aproximadamente 350 kPa, sendo σ'_v e σ'_h as tensões efetivas vertical e horizontal, respectivamente.

O tempo de cada ensaio variou entre 1 e 3 semanas, dependendo da relação K do ensaio em andamento.