

4 Programa experimental

4.1 Introdução

O presente capítulo apresenta o programa de ensaios, realizado no Laboratório de Geotecnia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Os ensaios tiveram como objetivo a caracterização e obtenção dos parâmetros geotécnicos da argila mole da Baixada Fluminense. A Tabela 25 mostra um resumo deste programa de ensaios.

Tabela 25 – Programa de ensaios de laboratório

Tipo de ensaio	Nº de ensaios
<i>Granulometria</i>	1
<i>Densidade dos Grãos</i>	1
<i>Limites de Atterberg</i>	1
<i>Composição Mineralógica</i>	3
<i>Teor de Matéria Orgânica</i>	15
<i>Determinação do pH</i>	1
<i>Adensamento Incremental (SIC)</i>	2
<i>Adensamento Contínuo (CRS)</i>	5
<i>Triaxiais CID</i>	3
<i>Triaxiais CIU</i>	3
<i>Triaxiais UU</i>	2

4.2 Amostragem

As amostras indeformadas foram extraídas em um único furo, realizado especialmente para este fim. O furo localiza-se na subárea Prédios e está situado a aproximadamente 1,5m de distância do inclinômetro I-9. As sondagens mais próximas foram identificadas como sendo CPTU-04 (ensaio de piezocone) e CB-54 (sondagem à percussão SPT). A Figura 37 mostra a localização destes furos em planta. Na época da amostragem, já havia sido instalada a manta de

geossintético e executada a camada de areia. As amostras foram retiradas nas profundidades de 2,50m; 3,40m e 4,30m. Nesta campanha foi utilizado o amostrador tipo Osterberg de pistão estacionário, com 10 cm de diâmetro e 80cm de comprimento.

A extração das amostras foi feita a partir de furo perfurado por lavagem direta até a cota de amostragem. Uma vez alcançada a cota desejada, procedia-se a inserção do tubo amostrador e deixava-se o conjunto em repouso por um período de aproximadamente três horas. Após a extração, as amostras eram parafinadas, identificadas e, em seguida, enviadas para o laboratório da PUC-Rio, onde ficaram acondicionadas na câmara úmida.

O programa de ensaios iniciou-se após o armazenamento das amostras em câmara úmida e compreendeu um período de oito meses. Poucos são os dados disponíveis na literatura que quantifiquem a influência do tempo de armazenamento das amostras na qualidade dos resultados obtidos. No entanto, há um consenso que devem ser evitados períodos longos de armazenamento, superiores a 1 ano.

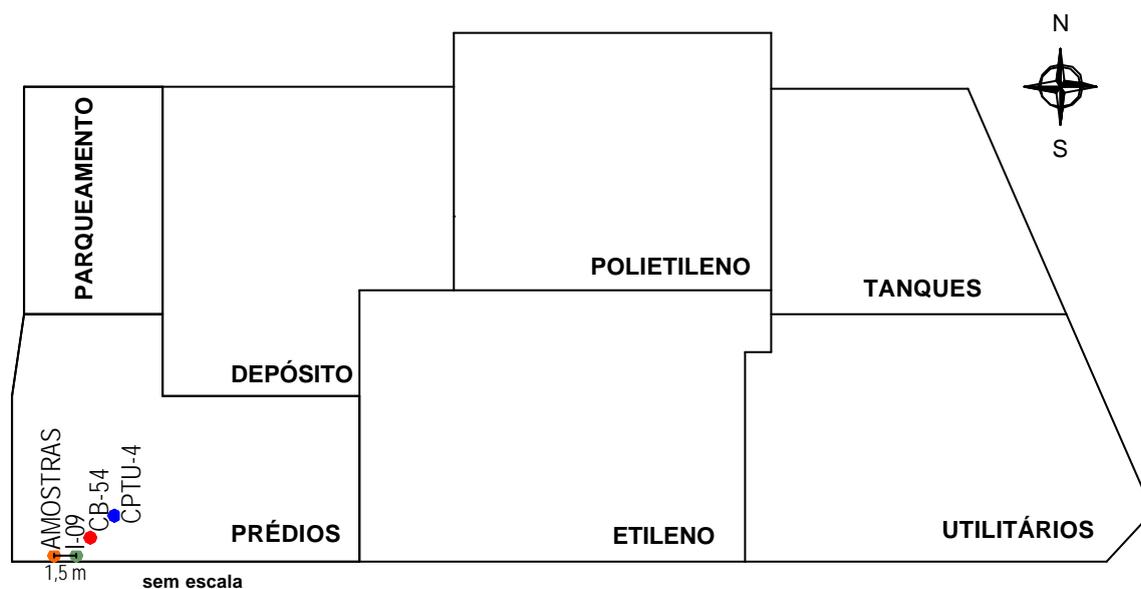


Figura 37 - Localização do furo de amostragem

4.3 Caracterização

4.3.1 Caracterização geotécnica

O ensaio de granulometria foi realizado segundo as prescrições da norma NBR 7181 da ABNT.

A partir do ensaio de granulometria, obteve-se a curva granulométrica que indicou 31% da amostra constituída pela fração areia, 34% constituída pela fração silte e 35% de fração argila.

A determinação dos Limites de Atterberg foi feita segundo as instruções gerais das normas NBR 6459 (LL) e NBR 7180 (LP). No ensaio para determinação do limite de liquidez, entretanto, foi utilizada amostra na umidade natural (sem secagem prévia), ao contrário do que é proposto pela norma. A realização destes ensaios a partir da umidade natural foi baseada nas recomendações feitas por Bjerrum (1973), que considera que os ensaios de limite de liquidez e plasticidade em argilas siltosas com matéria orgânica não devem ser realizados com amostras previamente secas ao ar, pois a secagem prévia do material afeta as características de plasticidade da argila.

Os valores obtidos foram de 113,7 % de Limite de Liquidez e 28,7 % de Limite de Plasticidade.

O ensaio de densidade relativa real dos grãos (Gs) seguiu a recomendação da NBR 6457 da ABNT. O valor encontrado como média de quatro determinações foi de 2,66.

4.3.2 Composição mineralógica

Foram realizadas análises mineralógicas por difração de raios-X em amostras de argila mole, no Laboratório de Difractometria do Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia (DCMM) da PUC-Rio. As análises foram feitas em difratômetro da marca Siemens, modelo D5000. O tubo é de ânodo de cobre com comprimento de onda de $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$. A tensão de trabalho é de 40KV e 30mA.

As condições do aparelho durante a realização do ensaio eram as seguintes: a fenda de divergência e a fenda de antiscattering apresentavam abertura de $0,6^\circ$; a faixa de varredura foi de 2 a 30° de ângulo de difração de raio-X (2θ), com passo de $0,02^\circ$ de 2θ e tempo do passo de 1 segundo.

O método de preparação das lâminas caracterizou-se pela obtenção da fração de solo mais fino, pelo ensaio de sedimentação convencional, seguido pela aplicação do material às lâminas. As lâminas da fração argila foram preparadas pelo método do gotejamento, sendo todas orientadas.

Foram realizadas difratometrias em 3 lâminas de fração argila, sendo a primeira em estado natural, a segunda glicolada e a terceira aquecida. A

glicolagem foi realizada submetendo-se uma lâmina já montada a uma atmosfera saturada de etileno-glicol, pelo período de 12 horas. Este procedimento visa verificar a ocorrência de argilominerais expansivos. O aquecimento foi realizado introduzindo-se uma lâmina em um forno a 350°C durante 4 horas.

4.4

Análises físico-químicas: matéria orgânica e pH

O teor de matéria orgânica (M.O.) foi estimado pelo método da perda de peso por aquecimento (P.P.A). Neste método, o solo é submetido a secagem em estufa, por 24 horas, com temperatura de 105°C. Após este período, o solo é levado a um forno especial (mufla) com alta temperatura (600°C) por um mínimo de 2 horas. O ensaio foi executado através de quinze determinações com o material que sobrava da preparação dos corpos de prova dos ensaios de adensamento e triaxiais.

O ensaio para a determinação do pH foi realizado seguindo-se a metodologia utilizada pela Embrapa (1997). O ensaio é feito vertendo-se 10 g de solo seco passado na peneira #40 em recipiente de vidro de 100ml de volume e acrescentando-se 25ml de água destilada e deionizada. A solução é agitada com um bastão de vidro e, ao final de 1h, mede-se o pH da solução. Esta medição foi feita com o equipamento mostrado na Figura 38. O valor do pH foi determinado para uma única amostra.



Figura 38 – Aparelho medidor do pH (MultiLine P3/Ph)

4.5 Ensaio de adensamento

4.5.1 Adensamento convencional (SIC)

Foram realizados dois ensaios de adensamento incremental, denominados de SIC-01 e SIC-02. Os corpos de prova correspondem às profundidades 3,20m e 3,25m, respectivamente. A moldagem foi feita por cravação lenta de anéis metálicos de 71,2mm de diâmetro e 20,0mm de altura, internamente lubrificadas com silicone, para minimizar o atrito lateral.

Após a instalação do corpo de prova na prensa e aplicação de uma pressão de assentamento (5 kPa), a célula de adensamento era inundada com água destilada.

Os ensaios foram realizados através da aplicação de seis estágios de carregamento axial (10, 20, 40, 80, 160 e 320 kPa) e quatro estágios de descarregamento (160, 40, 10 e 5 kPa). Na fase de carregamento, o incremento de carga de cada estágio ($\Delta\sigma_v/\sigma_v$) foi 1,0.

Os estágios de carregamento foram monitorados por 24 horas, sendo que o estágio de 320 kPa foi mantido durante 96 horas, para possibilitar maior precisão na obtenção do coeficiente de compressão secundária (c_α). O monitoramento das deformações verticais ao longo do tempo foi feito através de extensômetros mecânicos com precisão de 0,01mm.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de adensamento incremental estão apresentados no anexo 2.

4.5.2 Adensamento com velocidade de deformação constante (CRS)

O ensaio de adensamento CRS (“Constant Rate of Strain”) consiste essencialmente na aplicação gradual de carga na amostra, como resultado da imposição de uma taxa de deformação constante. Durante o ensaio, a drenagem é permitida pelo topo do corpo de prova, enquanto a base é mantida sob condição não drenada, com medição de poropressões. O ensaio é realizado em uma prensa para aplicação de carregamento uniaxial. A Figura 39 mostra o equipamento utilizado.

Corpos de prova com diâmetro médio de 8,73cm e altura média de 2,00cm foram moldados por cravação lenta do anel metálico no próprio

amostrador. A célula de adensamento era então montada, tomando-se o cuidado de introduzi-la em um recipiente com água destilada para garantir a saturação completa do sistema de medição de poropressão



Figura 39 - Prensa utilizada para os ensaios CRS

Com as válvulas de drenagem abertas, a parte superior da célula contendo o corpo de prova era instalada, evitando assim a formação de bolhas de ar. A célula de adensamento era então posicionada na prensa para aplicação de carregamento uniaxial.

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. As equações de calibração estão apresentadas no anexo 2.

Não foi necessário o uso de contrapressão na realização dos ensaios CRS, pois esta alternativa é recomendada para solos que não estejam previamente saturados.

A tensão vertical efetiva atingiu um valor máximo de 712 kPa na fase de carregamento dos ensaios. Todos os ensaios tiveram uma fase de descarregamento, a qual foi feita com a mesma velocidade de deformação utilizada na fase de carregamento.

A principal dificuldade do emprego de ensaios CRS é a definição da velocidade adequada de deformação. Esta velocidade deve ser tal que a geração de poropressão na base seja no máximo igual a 40 % da tensão total, segundo as recomendações de Carvalho (1993). A velocidade de deformação não deve ser superior a $3,8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, segundo Crawford (1964). Para tal, recomenda-se que seja executado, inicialmente, um ensaio piloto que permita a estimativa da velocidade mais adequada.

No presente trabalho foram realizados 4 ensaios (CRS-01, CRS-02, CRS-03 e CRS-05) com velocidades distintas e também um ensaio adicional (CRS-04) com amostra previamente amolgada. A Tabela 26 resume os valores das velocidades adotadas para este estudo, após as correções relativas aos ajustes das engrenagens da prensa.

Tabela 26 - Velocidades dos ensaios CRS

Ensaio nº	CRS-01	CRS-02	CRS-03	CRS-04	CRS-05
Velocidade (mm/min)	0,082	0,035	0,007	0,007	0,002
Velocidade deformação (s^{-1})	$6,8 \times 10^{-5}$	$2,9 \times 10^{-5}$	$0,58 \times 10^{-5}$	$0,58 \times 10^{-5}$	$0,17 \times 10^{-5}$

Nota: o ensaio CRS-04 foi realizado com amostra previamente amolgada

A influência da velocidade, assim como a validade dos limites acima recomendados, foi estudada com o objetivo de se verificar as variações geradas nos resultados dos ensaios CRS.

O ensaio com amostra previamente amolgada foi realizado para avaliar a influência da qualidade da amostragem e moldagem do corpo de prova. Para este ensaio foi necessário o amolgamento completo da estrutura original da amostra. O amolgamento da amostra efetuou-se durante cerca de 15 minutos

sob volume constante. A amostra foi acondicionada em 3 sacos plásticos sobrepostos evitando-se a perda de umidade do solo saturado durante o processo.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de adensamento com velocidade constante de deformação estão apresentados no anexo 2. Os valores correspondentes aos parâmetros c_v , M e k_v foram calculados com base nas formulações teóricas propostas por Wissa et al. (1971).

4.6

Ensaio triaxiais

O principal objetivo dos ensaios de compressão triaxial é a determinação das propriedades geomecânicas do solo: módulos de deformabilidade (E e ν), parâmetros da poropressão (A e B) e parâmetros de resistência ao cisalhamento (c' e ϕ'). Adicionalmente, outras propriedades podem ser diretamente obtidas nas fases anteriores ao cisalhamento, tais como a permeabilidade e o coeficiente de adensamento do solo.

Para a realização de ensaios triaxiais, foram utilizadas 3 prensas convencionais do laboratório, identificadas como 01, 02 e 03, sendo cada uma delas dotada de um motor elétrico, associado ao sistema de engrenagens por onde era feita a seleção da velocidade de cisalhamento do ensaio. A câmara triaxial, fabricada pela Wykeham Farrance Ltd, era composta de um cilindro de acrílico com a base e o topo metálicos. Maiores detalhes sobre o equipamento podem ser vistos em Bowles (1992). A Figura 40 apresenta uma vista geral da prensa 03.

As pressões confinantes e contra-pressões foram aplicadas pela utilização de um compressor de ar que mantinha as pressões constantes durante os ensaios. As poropressões e tensões confinantes eram medidas a partir de transdutores elétricos de pressão, e as deformações axiais eram obtidas através de transdutor elétrico de deslocamento.

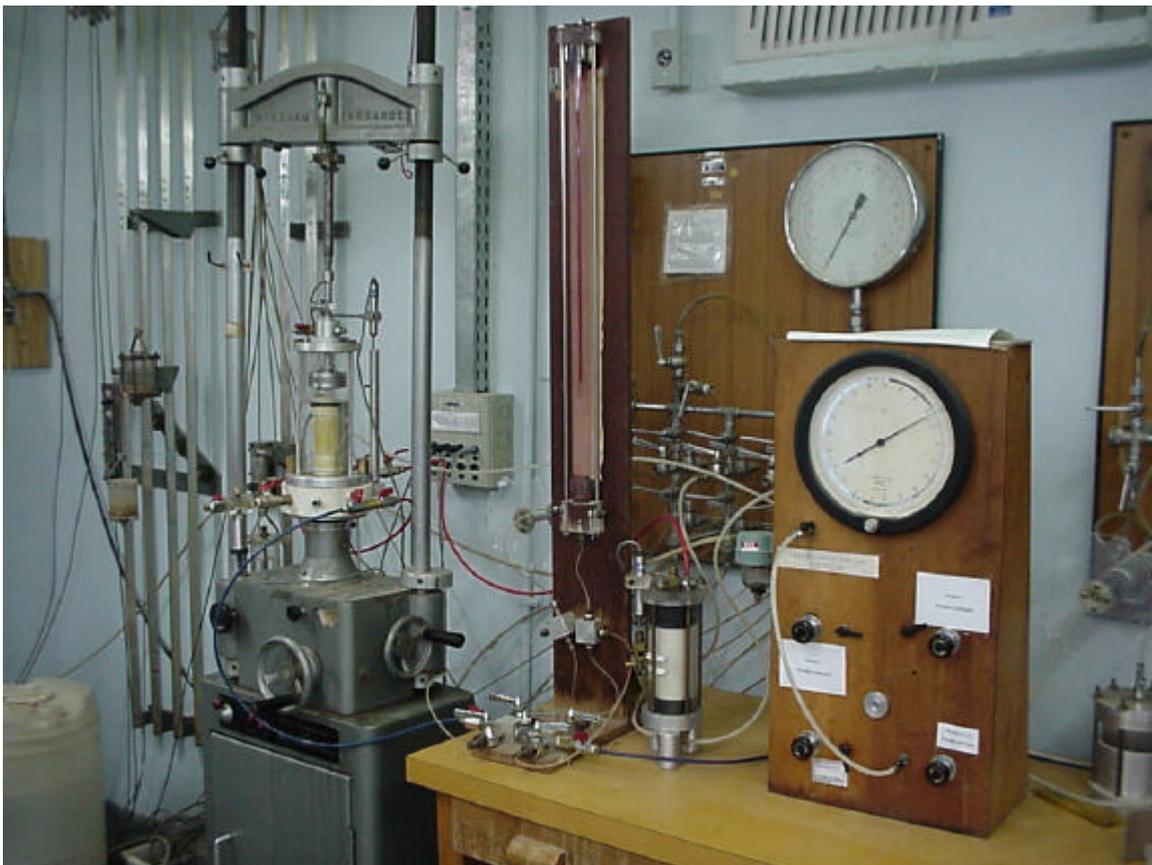


Figura 40 - Equipamento de compressão triaxial com acessórios e instrumentações

O sistema de aquisição de dados utilizado foi automático (ORION) e registrou as medições das células de carga, LSCDTs e medidores de poropressão.

A calibração dos instrumentos das prensas triaxiais foi realizada previamente à realização dos ensaios. Os instrumentos calibrados foram os medidores de deslocamentos, os transdutores de poropressão e as células de carga. As equações de calibração estão apresentadas no anexo 2.

As amostras utilizadas tinham a mesma origem das amostras do ensaio de adensamento. A preparação dos corpos de prova e os procedimentos para execução dos ensaios obedeceram às recomendações de Bishop & Henkel (1962) e Bowles (1992). Os corpos de prova apresentaram forma cilíndrica, com diâmetro de 38mm e altura de aproximadamente 78mm. Estas dimensões atendem a recomendação usual de razão altura/diâmetro em torno de 2,0, a fim de minimizar os efeitos do atrito nas extremidades (topo e base) e evitar a esbeltez excessiva (Lambe, 1951, Bishop & Henkel, 1962).

Durante a moldagem foram retiradas as sobras do material com o objetivo de se determinar o teor de umidade natural (w_o). Ao final, os corpos de prova eram submetidos à pesagem, visando a obtenção do peso específico natural.

Em todos os ensaios triaxiais, foram utilizados papel filtro e pedras porosas, previamente saturados, no topo e base do corpo de prova. É importante ressaltar que, antes da colocação do corpo de prova na câmara triaxial, as linhas de drenagem eram saturadas pela circulação de água deaerada. Os corpos de prova foram cuidadosamente envolvidos por membranas de borracha, fixadas por anéis de borracha na base e no topo. A seguir, a câmara era posicionada e preenchida com o fluido confinante. A Figura 41 mostra corpos de prova após a realização dos ensaios triaxiais e da secagem em estufa.



Figura 41 - Corpo de provas depois da realização de ensaio triaxial

4.6.1 Ensaio Consolidado Isotropicamente e Drenado (CID)

Foram realizados 3 ensaios de compressão triaxial do tipo CID, consolidado isotropicamente e drenado, onde a fase de cisalhamento é realizada sob condições drenadas e com medição da variação de volume. Em média, a fase de consolidação dos ensaios foi de aproximadamente 72 horas.

Na fase de cisalhamento, foram aplicados incrementos de pressão confinante, sob condições não drenadas, observados os desenvolvimentos das poropressões e computados os valores do parâmetro B de Skempton (1954). O cisalhamento foi realizado com uma velocidade de 0,002 mm/min, durante um período de aproximadamente 120 horas.

4.6.2

Ensaio Consolidado Isotropicamente e Não-Drenado (CIU)

No presente trabalho foram realizados 3 ensaios de compressão triaxial do tipo CIU, consolidado isotropicamente e não drenado, onde a fase de cisalhamento é realizada sob condições não drenadas e com medição de poropressão.

Inicialmente a pressão confinante foi aplicada em estágios, sob condições não drenadas para estimativa do parâmetro B de poropressão. A seguir, os corpos de prova foram adensados isotropicamente em um período de aproximadamente 72 horas. O valor do coeficiente de adensamento $c_v = 2,5 \times 10^{-4}$ (cm²/s), estimado nesta fase, permitiu a definição da velocidade de cisalhamento dos ensaios CIU, como sendo 0,0026 mm/min.

4.6.3

Ensaio Não-Consolidado e Não-Drenado (UU)

Foram realizados dois ensaios triaxiais do tipo UU, não consolidado e não drenado, sendo um com amostra indeformada e o outro com amostra amolgada.

Nestes ensaios uma pressão confinante de 100kPa foi aplicada sob condição não drenada. A fase de cisalhamento foi realizada com uma velocidade mais elevada do que o ensaio CIU, pois não havia interesse em acompanhar a variação da poropressão no cisalhamento. A velocidade foi estabelecida em 1,0 mm/min.

A amostra utilizada para a confecção do corpo de prova utilizado no ensaio remoldado foi amolgada da mesma maneira descrita anteriormente para o ensaio de adensamento CRS-04.