

3. Programa experimental

3.1. Introdução

O programa experimental consistiu na preparação, em laboratório, de amostras de argila mole e na execução de ensaios de caracterização, adensamento e triaxiais. O presente capítulo apresenta detalhes sobre o procedimento e equipamentos utilizados. No capítulo 04 é feita uma análise comparativa dos resultados obtidos.

3.2. Descrição do material

Os materiais utilizados para a confecção das amostras para os ensaios de laboratório foram a bentonita e o caulim.

Bentonita é o nome dado a uma argila de graduação muito fina, cujo principal componente é o argilomineral montmorilonita. A bentonita sódica incha, naturalmente, com a presença de água. Algumas bentonitas não incham como as bentonitas cálcicas e magnesianas.

A bentonita utilizada advém do Lago Pellerini, na Província de Rio Negro, Argentina. Segundo Hermann (2001) esta bentonita é sódica, se tratando de uma esmectita da série montmorilonita-beidelita, com pureza média de 95%.

O caulim é um material pobre em ferro, de cor branca a creme, formado predominantemente pelo argilo-mineral caulinita. Quanto menor é a quantidade de impurezas na caulinita, menor é a capacidade de troca catiônica, já que a caulinita praticamente não apresenta substituições isomórficas.

Há de se acrescentar que o caulim, somente, poderia representar perfeitamente o comportamento de argila devido à sua composição mineralógica.

Para a composição do material ensaiado neste trabalho foram realizadas misturas de caulim e bentonita na proporção de 98:2, em peso. Esta proporção deve-se ao fato de que a presença da bentonita, mesmo em quantidades reduzidas, dá condições adequadas de plasticidade e trabalhabilidade. As amostras assim preparadas apresentaram características de permeabilidade e

compressibilidade similares às dos materiais argilosos moles de depósitos litorâneos do sudeste brasileiro.

A mistura foi preparada manualmente em uma bandeja até que se obtivesse, visualmente, um material homogêneo com teor de umidade igual a cerca de duas vezes o valor do limite de liquidez, conforme sugerido por Carpio (1990).

3.3. Caracterização geotécnica

Foram realizados ensaios de caracterização com a mistura de caulim e bentonita para definir os valores dos índices físicos e a composição mineralógica. Todos os ensaios foram executados no laboratório de Geotecnia da PUC-Rio segundo as normas brasileiras. A seguir é feita uma breve descrição dos ensaios de caracterização, sendo que os resultados são apresentados em um quadro resumo, com exceção das características químicas que estão mostradas nos itens correspondentes.

3.3.1. Análise granulométrica

Os ensaios de análise granulométrica foram executados de acordo com a Norma NBR 7181. Fazem parte da análise granulométrica o peneiramento da fração areia e a sedimentação das frações silte e argila.

O material destinado para a obtenção da granulometria é passado por uma série de peneiras, obtendo-se a porcentagem de grãos com diâmetro médio maior que 0,075 mm. As porcentagens de material com grãos de diâmetro inferior a este valor são determinadas pelo ensaio de sedimentação, com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio. A interpretação dos resultados é feita mediante a comparação com escalas granulométricos padrões, admitindo-se válida a lei de Stokes.

Na Figura 9 é mostrada a curva granulométrica obtida para a mistura de caulim-bentonita utilizada no presente trabalho. A curva granulométrica mostra que o material argiloso utilizado no programa experimental é constituído por 75% de fração argila, 23% de fração silte e 2% por fração areia.

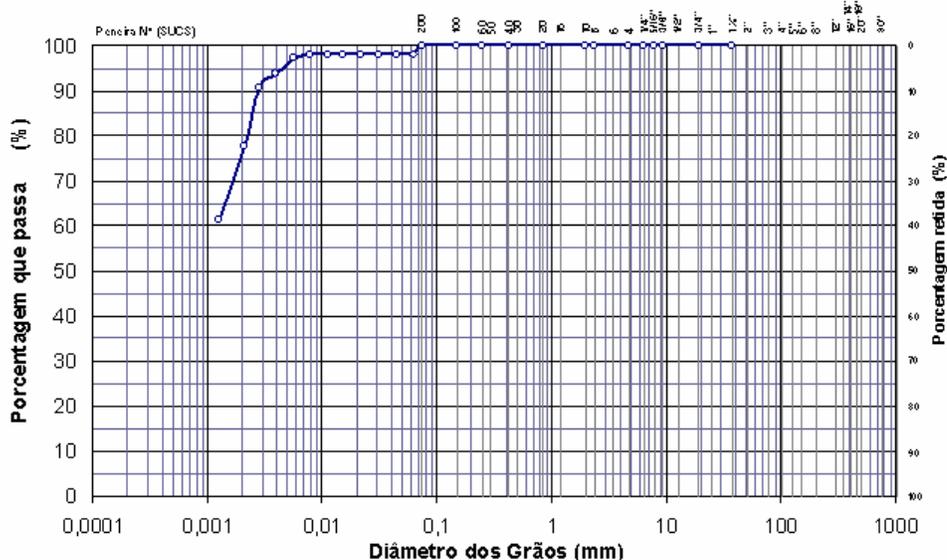


Figura 9 – Curva granulométrica da mistura de 98% de caulim com 2% de bentonita.

3.3.2.

Massa específica real dos grãos

A Massa Específica Real dos Grãos (G_s) é definida pela razão entre a massa e o volume dos grãos de um solo. Os ensaios para a determinação de G_s foram realizados segundo os procedimentos prescritos pela Norma NBR 6508, utilizando-se o material que passa na peneira com malha de 2 mm.

O valor $G_s = 2,64 \text{ g/cm}^3$; obtido para a mistura, está de acordo com os valores reportados na literatura para depósitos argilosos caulíníticos da Baixada Fluminense (Sayão, 1980), e da Baixada de Jacarepaguá (Garcés, 1995).

3.3.3.

Limites de consistência

A determinação dos limites de liquidez e plasticidade foi feita de acordo com os procedimentos das Normas NBR 6459 e NBR 7180, respectivamente. Foi utilizado material seco e destorroado, que passa na peneira com abertura de 2 mm. Tanto os ensaios de Limite de Liquidez (LL) quanto os de Limite de Plasticidade (LP) foram realizados utilizando-se de adição de água destilada.

Os valores de LL e LP obtidos para a mistura de caulim com bentonita foram de 68,1 e 39,2%, respectivamente.

3.4. Preparação das amostras

Existem diversas técnicas para a preparação de amostras de argila moldadas em laboratório, tais como: sedimentação, compactação e adensamento (sob condições isotrópicas ou anisotrópicas).

Segundo Kirkpatrick & Rennie (1973), as propriedades das argilas são dependentes de diversos fatores, dentre os quais destacam-se a estrutura do solo e a história de tensões.

A técnica de compactação não é adequada para preparar amostras saturadas. Além disso, a compactação induz um grau significativo de anisotropia na estrutura do material. A orientação das partículas depende do teor de umidade do material, do método de compactação e da energia de compactação empregados.

A fim de se obter amostras com um elevado grau de saturação e uma maior uniformidade do arranjo estrutural dos grãos, foi adotado o método do adensamento isotrópico.

A confecção das amostras inicia-se com a adição de água destilada à mistura até ser obtida um material cujo teor de umidade é aproximadamente 1,7 vez o limite de liquidez. No caso da mistura de 98% caulim e 2% bentonita, o material foi preparado com teor de umidade de aproximadamente 116%.

Com a ajuda de um molde cilíndrico de alumínio, com 5" de diâmetro, o qual servia como apoio inicial para a amostra, a mistura era cuidadosamente espalhada dentro de uma membrana de borracha de 100mm (4") de diâmetro, previamente colocada no interior de uma câmara cilíndrica. Durante a fase de adensamento hidrostático da amostra, foram instalados drenos laterais de papel-filtro com a função de facilitar a drenagem de água do material até as fronteiras drenantes de topo e base, tornando mais rápida a preparação da amostra.

Posteriormente, o material era adensado com uma tensão de confinamento de 65 kPa; sendo esta tensão mantida constante por um período de três dias.

Após esta etapa, a pressão de confinamento era reduzida para zero, permitindo-se a expansão do material durante 24 horas, obtendo-se, assim, um bloco cilíndrico cujas dimensões finais eram inferiores às iniciais. A Figura 10 mostra o aspecto final da amostra, após a retirada da câmara de confinamento.



Figura 10 – Amostra da mistura caulim-bentonita após o adensamento hidrostático.

Todos os ensaios reportados no presente trabalho foram realizados a partir de cinco amostras da mistura caulim-bentonita, cujas características são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características das amostras após preparação.

	Amostra nº				
	01	02	03	04	05
w (%)	122,7	129,7	130,0	137,1	134,9
γ_t (kN/m ³)	14,91	14,91	14,91	14,91	14,91
γ_d (kN/cm ³)	6,67	6,47	6,47	6,28	6,38
e	2,87	2,99	2,99	3,11	3,08
S (%)	113,0	114,3	114,6	116,0	115,7

3.5. Ensaio de adensamento

A campanha de ensaios foi composta de 07 (sete) ensaios de adensamento e três ensaios triaxiais. Dentre os ensaios de adensamento, (03) três foram do tipo incremental ou convencional (SIC), sendo 02 (dois) ensaios com leitura de poropressão na base. Foram ainda executados 04 (quatro) ensaios de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS). Estes ensaios possuem a finalidade de determinar as características de compressibilidade e adensamento. Os ensaios triaxiais tiveram uma fase inicial de adensamento hidrostático e uma a segunda fase de cisalhamento não-drenado (CIU). Estes ensaios triaxiais permitiram a obtenção dos parâmetros de resistência do material.

O programa experimental foi realizado com corpos de prova moldados a partir de amostras preparadas através do adensamento isotrópico. A moldagem do corpo de prova para os ensaios de adensamento realizou-se através da cravação cuidadosa de um anel de aço inoxidável de parede fina e ponta biselada. Antes da cravação, o anel foi lubrificado com óleo de silicone, visando minimizar o atrito lateral entre o solo e anel.



Figura 11 – Preparação do corpo de prova a partir de cravação do anel de aço inoxidável.

Imediatamente após a moldagem do corpo de prova, foram obtidos o peso específico total e o teor de umidade inicial da amostra. Este último é determinado pela média dos valores obtidos no topo, no centro e na base do corpo de prova. Com estes valores, pode-se calcular o índice de vazios e o grau de saturação iniciais do corpo de prova.

3.5.1. Ensaio de adensamento convencional (SIC)

O ensaio de adensamento convencional (SIC) consiste na aplicação de estágios com carga axial constante, sobre o corpo de prova. Devido a estas condições o corpo de prova fica confinado lateralmente, assim o diâmetro do corpo de prova é mantido constante, enquanto há a variação da dimensão axial do mesmo.

Para a moldagem dos corpos de prova, obedeceu-se à recomendação de Lambe (1951), com uma relação diâmetro/altura mínima de 2,5 para ensaios oedométricos. Como o tempo de dissipação da poropressão é diretamente proporcional ao quadrado da altura, foram escolhidos corpos de prova com 20 mm de altura.

Para a execução dos ensaios foram utilizadas prensas do tipo Bishop, mostradas na Figura 12. Nestas prensas, a carga axial é transmitida ao corpo de prova através de pesos previamente calibrados, através de um braço de alavanca com vantagem mecânica 10:1.

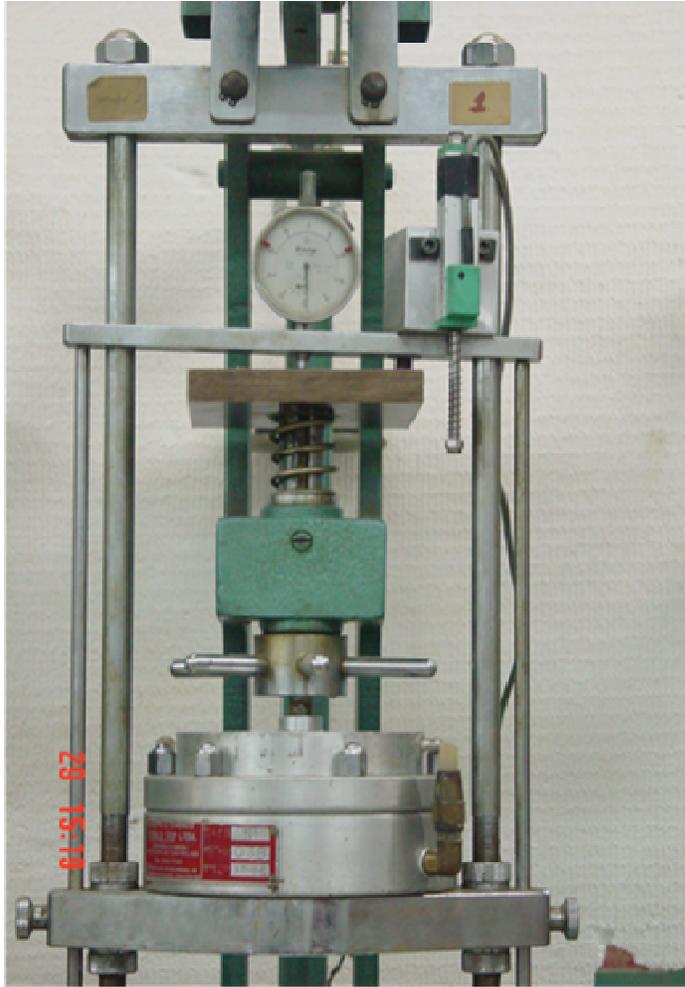


Figura 12 – Equipamento para ensaio de adensamento convencional (SIC).

Para a realização do ensaio, fora realizada a montagem da célula de adensamento na prensa que, em seguida, foi inundada. Durante a realização dos ensaios, os corpos de prova eram mantidos submersos. A drenagem era permitida através de pedras porosas e papéis filtros colocados no topo e na base da amostra. O papel filtro era molhado em água destilada antes da montagem e as pedras porosas fervidas, a fim de remover o ar e garantir a saturação do sistema de drenagem.

Após a instalação da célula, foi aplicada uma carga de assentamento. A seguir, o ensaio transcorria mediante a aplicação dos incrementos de carga constante com duração de 24 h.

Durante a fase de carregamento, os estágios de aplicação de carga foram realizados com incrementos de tensão $\Delta\sigma / \sigma = 1,0$, através da aplicação de oito estágios de carregamento axial (10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 e 1280 kPa). A fase de descarregamento foi acelerada, estipulando apenas três estágios de

descarregamento (320, 160, e 20 kPa), obedecendo-se, assim, uma relação $\Delta\sigma / \sigma = -3,0$.

Os estágios de carregamento foram monitorados por 24 horas registrando-se a variação da leitura do extensômetro nos tempos pré-determinados: 0, 6s, 15s, 30s, 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 8h e 24h.

Os principais resultados obtidos a partir dos ensaios de adensamento convencional foram os parâmetros de compressibilidade (C_c , m_v e D), obtidos graficamente a partir da curva e/e_0 vs $\log\sigma'_v$, bem como as características de adensamento (C_v e k) do material.

3.5.2.

Ensaio de adensamento com uma face drenante (SICu)

O ensaio de adensamento com uma face drenante (SICu) assemelha-se ao ensaio de adensamento convencional, no que diz respeito à moldagem, condições de confinamento confinado e aplicação de incrementos de carga axial.

Para a execução dos ensaios também foram utilizadas prensas do tipo Bishop A carga axial transmitida ao corpo de prova através de um braço de alavanca com vantagem mecânica 10:1. A célula de ensaio foi adaptada para permitir a instalação de um transdutor de poropressão ligado à pedra porosa da base do corpo de prova (Figura 13).



Figura 13 – Célula de ensaio de adensamento SICu com leitura de poropressão na base

Para a realização do ensaio, a montagem da célula de adensamento foi feita de maneira submersa, conforme mostrado na seqüência da Figura 14. Em seguida, a célula foi mantida inundada, a fim de manter o sistema livre da presença de bolhas de ar, o que poderia causar interferências nas leituras de poropressão.

Durante a montagem da célula de ensaio, as drenagens eram mantidas abertas para garantir um valor nulo de subpressão no corpo de prova. Somente após a montagem completa é que as drenagens de base eram fechadas, mantendo-se livre apenas a drenagem de topo.

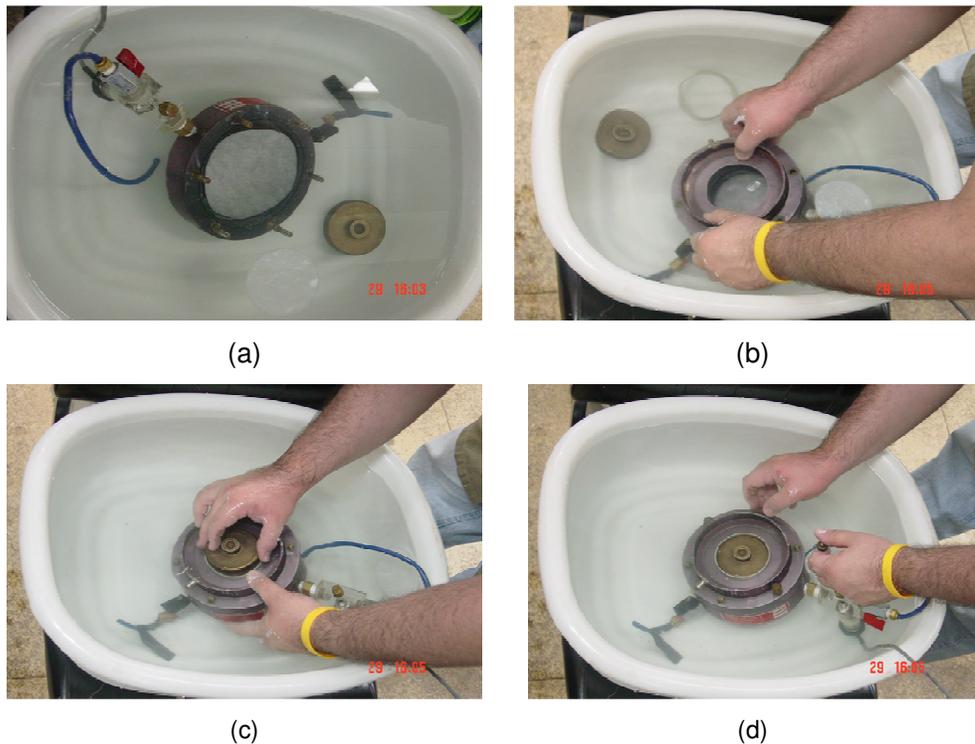


Figura 14 – Seqüência da montagem da célula de adensamento para realização de ensaio de adensamento com leitura de poropressão na base (SiCu).

A drenagem, tal como no ensaio SIC, foi permitida através de pedras porosa e papel filtro colocados no topo do corpo de prova. Antes da montagem, o papel filtro era molhado e as pedras porosas fervidas em água destilada, a fim de garantir a saturação do sistema.

Na base da célula de ensaio, era instalado o transdutor de poropressão. Também são colocados papel filtro e pedra porosa, contudo as drenagens eram mantidas fechadas para permitir a medição dos excessos de poropressão ao longo do tempo, durante os estágios de carregamento.

A partir desta etapa, o ensaio prosseguiu como um ensaio SIC convencional. A carga de assentamento era aplicada e o ensaio transcorria mediante a aplicação dos incrementos de carga com duração de 24 h.

Durante as fases de carregamento, os estágios de aplicação de carga foram realizados a partir incrementos de $\Delta\sigma / \sigma = 1,0$, com a aplicação dos oito estágios de carregamento axial (10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 e 1280 kPa). Na fase de descarregamento, foram especificados apenas três estágios (320, 160 e 20 kPa).

Os estágios de carregamento eram monitorados por 24 horas, com os valores de poropressão e de leitura do extensômetro registrados nos tempos pré-determinados: 0, 6s, 15s, 30s, 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 8h e 24h.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de adensamento com uma face drenante são os coeficientes de compressibilidade (C_c , m_v e D), determinados graficamente a partir da curva e/e_0 vs $\log \sigma'_v$, e as características de adensamento (C_v e k) do material, obtidas com a variação da poropressão durante os estágios.

3.5.3. Ensaio de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS)

O ensaio CRS consistia em aplicar no corpo de prova uma deformação com velocidade constante ao longo do tempo, com drenagem no topo e medição da poropressão na base do corpo de prova. Assim estimar-se-ia a tensão efetiva média do corpo de prova em qualquer instante do ensaio.

As vantagens deste ensaio foram a obtenção de resultados contínuos e a redução considerável do tempo de ensaio. Obtiveram-se as características de compressibilidade mais confiáveis, a partir de uma melhor definição da curva “ e vs $\log \sigma'_v$ ”. Outra vantagem foi a de automatização dos registros dos resultados, através de um sistema de aquisição de dados.

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.

A montagem da célula de adensamento consistia na colocação do corpo de prova entre duas pedras porosas. Não era permitida a drenagem da base, sendo instalado um transdutor de pressão.

Sobre a pedra superior, era posta uma placa de carregamento (*top cap*) a fim de distribuir, de maneira uniforme, o carregamento imposto ao corpo de prova. Este era um processo similar ao seguido durante a preparação de um ensaio triaxial. Todos os cuidados eram tomados a fim de evitar a presença de ar entre o corpo de prova, o papel filtro, a pedra porosa e a placa de carregamento perfurada durante a montagem. A água destilada era injetada através das linhas de contra-pressão para garantir que todo o ar fosse removido do sistema.

Uma leve pressão de assentamento era então aplicada ao corpo de prova, através do posicionamento manual do pistão de carregamento em contato com a placa de carregamento.

O ensaio de adensamento era iniciado impondo ao corpo de prova uma taxa constante de deslocamento, usando o mecanismo de carregamento do equipamento triaxial. A taxa de deslocamento foi estabelecida de forma a garantir que a poropressão gerada na base do corpo de prova se mantenha com valores reduzidos, ou seja, inferiores a um valor crítico, conforme definido por Smith & Wahls (1969) e Wissa et al. (1971).

Para a realização dos ensaios CRS, foi utilizada a formulação de Wissa et al. (1971) para a estimativa inicial da velocidade de ensaio. A formulação é mostrada na Equação 3.1.

$$v = \frac{C_v \times C_c}{m_1^2 \times H_0 \times (1 + e_0)} \times \left[\frac{u_b / \sigma_v}{-0,7 \times (u_b / \sigma_v)} \right] \quad (3.1)$$

onde: C_v = coeficiente de adensamento; C_c = índice de compressão; m = valor constante, entre 0,6 e 0,8; H_0 = altura inicial do corpo de prova; e_0 = índice de vazios inicial; u_b / σ_v = razão entre poropressão na base e a tensão total aplicada.

A partir da formulação acima foi estimada a velocidade “ideal” de ensaios de 0,020 mm/min. A partir deste valor, foram estipuladas as outras velocidades para realização do programa de ensaios CRS, conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3 – Velocidades utilizadas para os ensaios de adensamento CRS.

Ensaio nº	01	02	03	04
Velocidade (mm/min)	0,0163	0,0370	0,0488	0,0610

Durante o adensamento do corpo de prova, os valores de poropressão contra-pressão, carga e deformação foram automaticamente registrados e armazenados para posterior processamento.

Os resultados obtidos a partir deste ensaio, correspondentes a m_v , C_v e k , podem ser calculados a partir das formulações propostas por Wissa et al (1971). Os valores dos coeficientes de compressibilidade foram obtidos graficamente, da mesma forma que para os resultados dos ensaios convencionais (SIC), a partir das curvas e/e_0 vs $\log \sigma'_v$.

3.6. Ensaio triaxiais

Este ensaio é dividido em duas fases sendo a primeira de adensamento e a segunda de cisalhamento. Os ensaios podem ser classificados de acordo com a execução de cada etapa, conforme descrito a seguir:

- C.I.U.: Consolidado e Não-Drenado: neste ensaio é primeiramente realizado o adensamento do corpo de prova, a fim de garantir as tensões efetivas, para posterior cisalhamento de forma não-drenada, ou seja, com geração de poro-pressão e sem variação de volume do mesmo;
- C.I.D.: Consolidado e Drenado: neste ensaio é primeiramente realizado o adensamento do corpo de prova, a fim de garantir as tensões efetivas, para posterior cisalhamento de forma drenada, ou seja, sem geração de poro-pressão e com variação de volume do mesmo;
- U.U.: Não-Consolidado e Não-Drenado: neste ensaio não é permitido o adensamento, mantendo-se as condições de volume e umidade do corpo de prova. O cisalhamento é realizado de forma não-drenada, sem variação volumétrica e com geração de poro-pressões no corpo de prova.

Os ensaios triaxiais realizados neste programa experimental foram do tipo CIU para se obter o comportamento da poropressão durante a fase de cisalhamento. As tensões efetivas de confinamento aplicadas foram de 100, 200

e 400 kPa. As contra-pressões aplicadas foram de 200 kPa procurando, assim, evitar a presença de bolhas de ar no corpo de prova.

O equipamento para a realização destes ensaios foi a câmara para ensaio triaxial convencional. No caso deste estudo foram utilizadas prensas dotadas de motor elétrico, associado a um sistema de engrenagens, o que permitia a possibilidade de seleção de velocidade de cisalhamento imposta ao corpo de prova.

As pressões do fluido de confinamento eram aplicadas por sistemas de compressores de ar e/ou potes de mercúrio. Estas eram registradas por transdutores de pressão, previamente calibrados. As cargas axiais aplicadas eram registradas por célula de carga, também, calibrada previamente, posicionada no interior da câmara triaxial.

As deformações axiais foram obtidas a partir de transdutores eletrônicos de deslocamentos (LVDTs), os quais foram também previamente calibrados.

A partir da amostra preparada em laboratório eram preparados os corpos de prova (Bishop & Henkel; 1962), para o qual se utilizava um moldador e um berço cilíndrico. O corte dos excessos laterais era realizado com um fio de aço a fim de garantir o formato do corpo de prova

Depois de moldado, o corpo de prova era cuidadosamente levado para a câmara triaxial, sendo apoiado sobre pedra porosa e papel filtro, previamente saturados. Em seguida, colocava-se a membrana de látex com cuidado de minimizar o amolgamento e evitar a presença de bolhas de ar entre a membrana e o corpo de prova. Posteriormente eram colocados o papel filtro, a pedra porosa e o cabeçote acrílico (“top cap”). A membrana era fixada à base da célula e ao cabeçote, com o auxílio dos “orings” de vedação.

Terminado o processo de instalação do corpo de prova, a câmara era fechada e preenchida com glicerina, a fim de evitar quaisquer interferências nas leituras dos transdutores eletrônicos, e de maneira lenta, de forma a evitar a presença de bolhas. A seguir aplicava-se uma pressão de confinamento isotrópico e lida a poropressão gerada na mesma, a fim de se obter o parâmetro B de Skempton. Eram aplicados sucessivos incrementos de pressão confinante até que seja alcançado um valor mínimo de $B = 0,98$.

Depois de garantida a saturação do corpo de prova, era iniciado o processo de adensamento. Esta etapa consiste na aplicação da tensão confinante durante um período de 24 horas, período este que garantia o adensamento completo do corpo de prova. Durante este período as drenagens

do corpo de prova eram mantidas abertas e registradas as variações de volume do corpo de prova.

A partir de então se iniciava o cisalhamento do corpo de prova, com a aplicação progressiva de uma tensão desviadora, na direção axial, de forma a levar o corpo de prova à ruptura.

A partir de ensaios triaxiais foram obtidos os parâmetros de resistência do material: ângulo de atrito efetivo (Φ') e o intercepto coesivo do material (c').

Foi possível, também, a obtenção de outros parâmetros, como Módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν), ao se medirem as deformações sofridas pelo corpo de prova durante a fase de cisalhamento. Como os ensaios foram não-drenados, obtiveram-se, ainda, o parâmetro A de Skempton, a partir da variação da poropressão no corpo de prova, durante a fase de cisalhamento.