

3

Equipamento, Rotinas de Ensaio e Programa de Ensaios.

3.1.

Equipamento

3.1.1.

Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

Os ensaios de cisalhamento direto na condição submersa ou inundada foram desenvolvidos no equipamento de cisalhamento direto; o qual é composto de uma prensa convencional da marca *Wykeham Farrance Int.* (tipo deformação controlada).

O sistema de medição está conformado por um anel de carga que mede a carga horizontal, transdutor de deslocamento vertical e horizontal. A carga vertical é imposta e medida através de pesos colocados em um pendural com alavanca. A figura 3.1 apresenta o equipamento de cisalhamento direto utilizado para a obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras submersas.



Figura 3.1 – Equipamento de Cisalhamento Direto Convencional da PUC-Rio.

3.1.2.

Ensaio de Cisalhamento Direto Com Sucção Controlada

O programa principal de ensaios nas amostras submetidas a diferentes níveis de sucção foi desenvolvido com o equipamento de cisalhamento direto com sucção controlada da PUC-Rio, sendo abreviado por CDSC. O equipamento foi projetado por de Campos (1988), desenvolvido por Fonseca (1991) e modificado por Carrillo (1993). Equipamentos similares a este encontrados na literatura foram citados por Fonseca (1991). Ver tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Principais Características dos Equipamentos CDSC, adaptado de Fonseca (1991).

Características do Equipamento	Escario (1980)	Gan e Fredlund (1988)	Escario (1986)	PUC-Rio Fonseca (1991)
Tamanho da amostra (mm)	(50 x 50 x22)	(50 x 50 x22)	(50 x 50 x22)	(100x100x21, 8)
Elemento Drenante *	DAVE ou MSP (at 1500 kPa)	DAVE (até 500 kPa)	DAVE ou MSP (até 1500 kPa)	DAVE (até 300 kPa)
Fluido Usado na Câmara de Compressão	Nitrogênio	Ar comprimido	Nitrogênio	Ar comprimido
Uso da Técnica de Translação de Eixos	Sim	Sim	Sim	Sim
Medida de Volume de água	Não	Sim	Não	Sim
Parte de Caixa que desloca	Superior	Inferior	Superior	Inferior
Forma de Transmissão da Carga Vertical	Pistão	Pistão	Câmara de nitrogênio	Célula de carga
Medida dos Deslocamentos Vertical e Horizontal	Mecânica	Eléctrica	Mecânica	Eléctrica
Uso de Prensa Convencional	Não	Sim	Sim	Sim
Caixa de Cisalhamento Constitui Anel Moldador	Não	Não	Não	Sim
Manutenção da Separação das Duas Caixas Durante o Cisalhamento	Não	Não	Não	Sim
Dave-disco Cerâmico de Alto Valor de entrada de Ar				
MSP - Membrana Semi- Permeável				

O equipamento é uma modificação do equipamento de cisalhamento direto convencional e está composto por: uma câmara de pressão de ar, caixa de cisalhamento bipartida no interior dela, disco de alto valor de entrada de ar, sistema de aplicação de pressões, sistema de extração de bolhas de ar, sistema de aplicação de carregamento vertical e sistema de medição e aquisição de dados. Ver figura 3.2.



Figura 3.2 – Equipamento de Cisalhamento Direto com sucção controlada da PUC-Rio.

A seguir se descreve mais detalhadamente os componentes do equipamento:

3.1.2.1. Câmara de pressão de Ar

A câmara de pressão de ar é uma câmara de forma cilíndrica feita de aço de 210 mm de altura, 250 mm de diâmetro e uma espessura de 15 mm; a base e a tampa são feitos com duralumínio. A câmara foi construída para poder suportar pressões de até 1000 kPa.

A tampa da câmara está fixada ao corpo através de 8 parafusos, os quais permitem a vedação total da câmara. Além disso, a tampa possui um orifício por onde atravessa a célula de carga que se encarga de medir e transmitir a carga vertical. Este orifício é vedado através de um anel de borracha (*o ring*).

No interior da câmara localiza-se a célula de carga horizontal, encargada de medir a força cisalhante ao longo do cisalhamento da amostra, a caixa de cisalhamento bipartida, onde é introduzida a amostra, o disco espaçador

encargado de separar as partes superior e inferior da caixa cisalhamento, evitando todo atrito ao longo do cisalhamento, e a haste encostada sobre a face esquerda da caixa de cisalhamento que faz a união com o motor que fornece a carga horizontal.

No exterior da câmara se encontra o transdutor de pressão de ar encargado de medir a pressão do ar no interior da câmara e que envolve a amostra, o transdutor de deslocamento vertical, que está encostado na célula de carga vertical, o transdutor de deslocamento horizontal que está conectado à caixa de cisalhamento através de uma haste que atravessa a câmara por um furo. Na figura 3.3 apresenta-se uma secção transversal da caixa de cisalhamento.



Figura 3.3 – Câmara de Pressão de Ar.

3.1.2.2. Caixa de Cisalhamento

A caixa de cisalhamento possui nas partes superior e inferior um rasgo concêntrico de secção quadrada de 100 mm de lado. Além disso, esta está feita de duralumínio e tem forma circular que se encontra unida pela base a um reservatório de água fechado por um disco cerâmico de alto valor de entrada de ar (DAVE) que foi colado pelas bordas.

O DAVE é um disco cerâmico poroso que possui a propriedade de permitir a passagem da água, mas não do ar, tem uma espessura de 7,3 mm, 146 mm de diâmetro e valor de pressão de borbulhamento de 300 kPa (limite máximo de aplicação de sucção). Na figura 3.4 mostra-se uma foto da caixa de cisalhamento.



Figura 3.4 – Caixa de cisalhamento Bipartida.

3.1.2.3. Sistema de aplicação de pressões

As pressões de ar e de água são aplicadas através das válvulas localizadas no painel de ar comprimido. No caso da pressão de ar é aplicada diretamente abrindo a válvula correspondente à linha que vai até a câmara. No entanto, a pressão de água é enviada através de um recipiente que serve de interface de ar – água. O painel possui duas válvulas, um manômetro tipo relógio com resolução de 7 kPa. Cabe ressaltar que as pressões aplicadas são finalmente ajustadas com os valores medidos nos transdutores de ar e água. Ver figura 3.5.



Figura 3.5 – Câmara de Ar comprimido com válvulas para pressão de água e ar.

3.1.2.4. Sistema de aplicação de carregamento vertical

Do mesmo modo que se faz a aplicação do carregamento vertical no equipamento de cisalhamento direto convencional, faz-se aqui, utilizando pesos colocados em um pendural com alavanca. O pendural transmite a carga diretamente à célula de carga vertical, que por sua vez aplica a carga ao “top-cap” que está acima da amostra. Com o objetivo de eliminar variações na carga vertical produto da movimentação da caixa durante o cisalhamento, Delgado (1993), colocou uma união tipo universal na ponta da célula, conseguindo reduzir estas variações.

Além disso, foram colocadas duas hastes paralelas à célula de carga com o objetivo de fixá-la, ficando sempre em contato com a amostra e evitando um deslocamento para cima decorrente da diferença de pressão de ar na célula de carga. Ver figura 3.6.



Figura 3.6 – Sistema de aplicação de carga vertical composto por um pendural e braço de alavanca.

3.1.2.5. Sistema de extração de bolhas de ar

O sistema de extração de bolhas de ar, implementado por Carrillo (1993), tem por objetivo tirar as bolhas de ar difuso através do disco (DAVE) e poder corrigir o volume que entrou ou saiu da amostra.

Este sistema consiste em gerar um fluxo contínuo de água no trecho copo coletor - reservatório localizado abaixo do DAVE. O ar contido na água passa pelo copo e fica retido, retornando ao reservatório só água pura. Ver figura 3.7.



Figura 3.7 – Sistema de extração de bolhas de ar.

3.1.2.6. Sistema de Aquisição de dados

Este sistema esteve conformado para realizar a aquisição de dados dos transdutores de pressão de ar e água, dos transdutores de deslocamento horizontal e vertical, das células de carga vertical e horizontal, e do medidor de variação de volume. As calibrações destes instrumentos estão apresentadas no anexo A do presente trabalho. Ver figura 3.8.



Figura 3.8 – Sistema de Aquisição de Dados.

3.1.3. Imposição de sucção com Dessecadores

O equipamento utilizado para a imposição da sucção através da umidade relativa foram os dessecadores contendo uma solução de NaCl de 99% de pureza, diluída em água deionizada. Ver figura 3.9.



Figura 3.9 – Imposição da sucção através dos dessecadores.

3.1.4. Determinação da curva Característica

No caso na determinação da sucção através da técnica de papel filtro utilizou-se papel filtro tipo Whatman N°42 cortado no mesmo diâmetro das amostras (anéis), (ver figura 3.10).

A curva de calibração utilizada para correlacionar a umidade com a sucção medida foi a proposta por Chandler et al. (1992) ver equação 3.1 e 3.2. Para a pesagem dos papéis filtro utilizou-se uma balança digital de 4 casas decimais.

Umidade >47%:

$$\text{sucção (kPa)} = 10^{(6.05 - 2.48 \log w)} \quad (3.1)$$

Umidade <47%:

$$\text{sucção (kPa)} = 10^{(4.84 - 0.062 \log w)} \quad (3.2)$$



Figura 3.10 – Papel filtro tipo Whatman N°42 utilizado na determinação da curva de retenção.

3.2. Rotinas de Ensaio

3.2.1. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

A execução do ensaio foi desenvolvida de acordo com a norma ASTM (3080), nas condições submersa e drenada.

A velocidade de cisalhamento adotada foi de 0.182mm/min, calculada a partir da curva de adensamento, como foi proposto por Bishop e Henkel (1962).

As amostras foram cisalhadas até um deslocamento máximo de 15 mm.

3.2.2. Ensaio de Cisalhamento Direto Com Sucção Controlada

A primeira etapa, antes de começar com o desenvolvimento dos ensaios, foi a realização da calibração dos instrumentos de medição que foram utilizados para a aquisição de dados. Além disso, foi necessária a calibração do braço de alavanca para a aplicação da carga vertical.

Continuou-se com a saturação das linhas de pressão de água por percolação, retirando todas as bolhas de ar oclusas no sistema, seguidamente saturou-se o disco de alto valor de entrada de ar (DAVE).

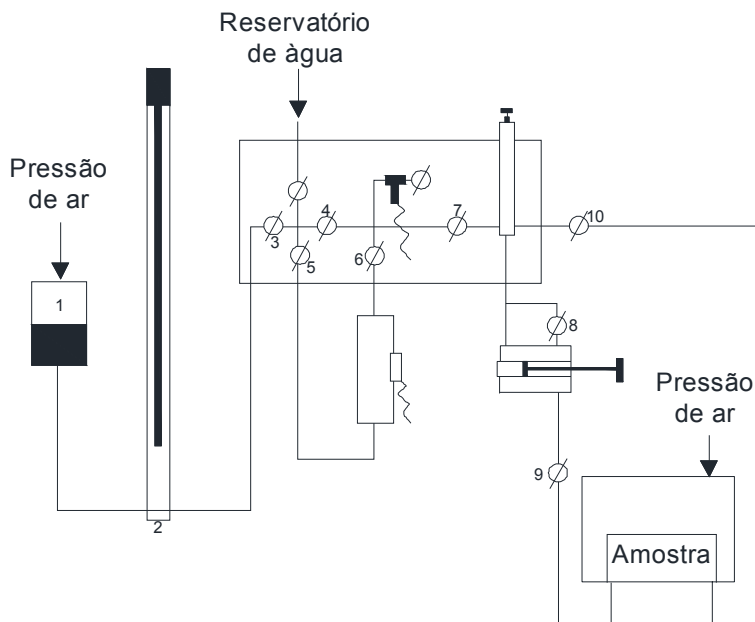
Cabe ressaltar que este processo foi efetuado antes do início de cada ensaio.

Para a saturação do DAVE, cobriu-se o disco primeiramente com uma camada de água, logo após, foi imposta uma pressão de ar dentro da câmara fechada que gera um gradiente por diferença de cargas. A água atravessa a pedra porosa ocupando os vazios dela e expulsando o ar ocluso. Da mesma forma, o reservatório que fica em baixo do DAVE é cheio totalmente com água, assegurando uma fase contínua dentro da câmara.

Com ajuda do medidor de variação de volume, foi registrado o fluxo através do DAVE, onde se considerou a finalização da saturação uma vez que o gráfico de volume de água que sai do sistema versus o tempo ficasse constante (uma reta). No anexo é apresentada toda a informação relacionada com o processo de saturação do DAVE.

Após de ter as linhas saturadas e o DAVE saturado, verificou-se a eventual existência de pontos de vazamento. Conforme (Delgado 1993), foi aplicada uma pressão de água superior ao admissível entre trechos isolados.

Numa eventual existência de vazamento o medidor de variação de volume registraria uma variação no volume de água. Na figura 3.11, apresentam-se os trechos que foram isolados para a avaliação de vazamentos.



Trecho	Válvulas abertas	Válvulas Fechadas
1 - 2	-	2
1 - 3	2	3
1 - 4	2, 3	4, 5
1 - 5	2, 3	4, 5
1 - 6	2, 3, 5	4, 6
1 - 7	2, 3, 4	5, 6, 7
1 - 8	2, 3, 4, 7	5, 6, 8, 9, 10
1 - 9	2, 3, 4, 7, 8	5, 6, 9, 10

Figura 3.11 – Trechos de avaliação para detecção de vazamentos, Adaptado de Delgado (1993).

Os corpos de prova foram obtidos com moldes tipo anel biselado quadrado, com lados medindo 100 mm e altura. 21,6 mm, a partir de blocos de indeformados.

Em alguns corpos de prova, a equalização de sucção iniciou-se fora da câmara de compressão, em um dessecador com uma solução salina. Para se

atingir determinado nível de sucção desejado, o tempo de equalização foi de 10 dias dentro do dessecador.

Na etapa da montagem do ensaio, primeiramente foi colocada a caixa de cisalhamento acima do DAVE, com prévia retirada da camada de água. Recomenda-se retirar tal camada com papel toalha com o fim de diminuir o tempo de equalização, como foi verificado por Soares (2005). Assim, antes de transferir a amostra para a caixa de cisalhamento, retirou-se a parte superior da caixa e ajustaram-se os LSCDTs e o medidor de variação volumétrica, colocando-os em suas marcas zero. Como foi mencionado anteriormente, antes de cada ensaio foi necessário verificar a existência de bolhas de ar no sistema de aplicação de pressão, eliminando-as quando fora necessário.

Após a colocação da caixa de cisalhamento, um papel filtro úmido era colocado dentro dela, sobre o DAVE. Seguidamente era introduzida a amostra. Sobre a amostra, foi colocado um papel filtro e a pedra porosa grossa, que é responsável pela distribuição uniforme da pressão de ar. Ressalta-se que tanto o papel filtro quanto a pedra porosa acima do corpo de prova estavam secos. Em seguida colocou-se o “cap” metálico superior.

Foram retirados os parafusos que unem as duas metades da caixa de cisalhamento. Com o auxílio de um disco espaçador e dois extensômetros, levantou-se a parte superior da caixa de 0,5 mm. Daí retirou-se os extensômetros e fechou-se a câmara de compressão, atentando-se em encaixar a união universal da célula de carga vertical corretamente sobre o *top-cap*.

Os níveis de água da interface ar/água e do copo de coleta eram verificados, ajustando-os às suas respectivas marcas zero, sendo que a pressão de água a ser usada no ensaio estava sendo aplicada, deixando a amostra isolada, fechando as válvulas que dão acesso à base do equipamento. Isto feito, a pressão de ar na câmara de compressão era aplicada e as válvulas para a aplicação da pressão de água eram abertas, gerando a sucção desejada.

A partir daqui se iniciou a fase de equalização. Esta era atingida no ponto onde a variação de volume registrada permanecera constante, ou seja, a água da amostra não saía nem entrava na amostra. Após atingida a equalização, colocou-se os pesos, iniciando nesta etapa o adensamento da amostra. O adensamento era considerado finalizado uma vez que o medidor de variação de volume não registrasse mais variação.

Antes de iniciar a fase de cisalhamento, utilizava-se a bomba de extração de ar a fim de se retirar as possíveis bolhas de ar existentes, e quantificava-se o volume extraído. Vale destacar que tal volume sempre foi desprezível (da ordem

de 0,1cm³). Logo em seguida, a amostra foi cisalhada com velocidade constante e igual a 0,00975 mm/min em ambos os solos, a velocidade escolhida foi menor que as calculadas conforme procedimento proposto por Ho e Fredlund (1982). Esta velocidade foi necessária para poder conseguir um ensaio drenado. Os cálculos da velocidade estão apresentados no apêndice B. Os ensaios de cisalhamento chegaram até um deslocamento horizontal de 10 mm. Atingido o deslocamento, retirava-se a carga vertical, a pressão de água e a pressão de ar, obedecendo à ordem inversa de aplicação. Ao final do ensaio, determinava-se a umidade final do corpo de prova.

3.2.3. Imposição de sucção com Dessecadores

Os corpos de prova os quais foram sujeitos a uma imposição de sucção pela técnica da umidade relativa foram colocados nos dessecadores junto com uma solução de água destilada e NaCl numa proporção (peso de soluto por volume de solvente). Para se atingir determinada pressão de vapor no interior do dessecador equivalente ao nível de sucção, depois de colocado o corpo de prova aplicou-se vácuo dentro do dessecador. O Cloreto de Sódio usado nas soluções é denominado, por seu fabricante, NaCl P.A com 99,9% de pureza. O vapor formado tende a entrar em equilíbrio com o solo e induz a sucção desejada. Com a equação 3.1 (Marinho, 1994) foi possível determinar a concentração de soluto. Na Tabela 3.1 encontram-se as sucções e concentrações de soluto usadas neste trabalho.

$$sucção = 4598,95 \times m^{1,00122} \quad (3.1)$$

Onde m é a molaridade do soluto, isto é, a proporção entre sal e água pura usada em uma solução, em mol/L.

Tabela 3.2 – Concentrações de soluto para as sucções desejadas.

Sucção (kPa)	Molaridade (mol/g)	Concentração (g/L)
60	0.0131	0.77
120	0.0263	1.54
200	0.0437	2.55
Peso molar de NaCl = 58,44 g/mol		

Os corpos de prova foram utilizados nos ensaios após atingir a sucção desejada, ou seja, cumprir o tempo de equalização que foi no mínimo de 10 dias.

3.2.4. Determinação das curvas de Retenção

Foram confeccionados 10 corpos de prova com anéis circulares para cada curva de retenção de ambos os solos, obtendo-se o respectivo teor de umidade de campo. Após a moldagem, cada anel era embalado com filme de PVC e papel alumínio, para evitar qualquer perda de umidade.

Após a determinação da umidade inicial de cada corpo de prova, era estimada a quantidade de água a ser adicionada ou retirada de cada corpo de prova, levando-se em consideração uma faixa de teor de umidade entre o valor residual e o de saturação. Dessa forma, se teria pontos suficientes para a determinação da curva característica. Com o objetivo de representar a histerese do material seguiu-se trajetórias de umedecimento e secagem, a partir de um ponto seco e saturado, respectivamente.

Para obter a curva de umedecimento adicionou-se água pesando continuamente até conseguir o peso desejado. Quando se fez necessário diminuir a umidade do solo, o mesmo foi realizado deixando o corpo de prova secando ao ar. Após isso, os anéis foram embrulhados com filme de PVC e papel alumínio, para logo ser colocados em uma caixa de isopor fechada por 48 horas para que a umidade se distribísse uniformemente por todo solo dentro do anel. Passado esse tempo, foram colocados os papéis-filtro em contato com o solo no topo e na base de cada anel, para iniciar o processo de equalização e medir a sucção do anel.

Novamente, os anéis eram embalados com filme de PVC e papel alumínio e colocados na caixa de isopor, permanecendo ali por 10 dias, para que ocorresse a equalização das sucções nos diversos anéis.

O passo seguinte era a pesagem dos papéis-filtro úmidos. Esta foi feita durante 3 min, em intervalos de 10 s, nos 2 primeiros minutos, e 15 s no minuto final em uma balança de resolução de 0,0001 g. Finalmente os papéis foram levados à estufa para a secagem com temperatura entre 100 e 110° C por no mínimo 2 horas (Marinho 1997). Os corpos de prova secos também foram pesados. Com esses dados determinou-se a umidade dos papéis filtro, a sucção correspondente e o teor de umidade do solo, posteriormente plotou-se os pontos obtidos num gráfico umidade versus sucção.

3.3. Programa de Ensaio

Para cada solo investigado, o programa principal de ensaios foi composto por 3 ensaios de cisalhamento direto convencionais, 9 ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada e 6 ensaios de cisalhamento direto com ciclos de umedecimento e secagem. Os níveis de sucção utilizados em todos os ensaios com sucção controlada foram de 60 kPa, 120 kPa e 200 kPa. As tensões normais líquidas foram de 40 kPa, 80 kPa e 120 kPa. Os ciclos de umedecimento e secagem foram executados na forma mostrada na tabela 3.3.

Cabe mencionar que a justificativa para escolha das tensões normais foi pelo fato que a pesquisa envolve escorregamentos em camadas superficiais do solo. Enquanto que os níveis de sucção adotados foram escolhidos com o fim de ter pontos suficientes e separados para poder definir a envoltória além de ter como limite máximo o valor de entrada de ar do DAVE (300 kPa).

Tabela 3.3 – Séries de ensaios de cisalhamento direto convencional, com sucção controlada e com ciclos de umedecimento e secagem, respectivamente.

Série	Ensaio	Tensão Normal (kPa)
I (CD CONVENCIONAL)	CD 1	40
	CD 2	80
	CD 3	120

Série	Ensaio	Tensão Normal Líquida (kPa)	Sucção Mátrica (kPa)
I (CDSC)	CDSC 1	40	60
	CDSC 2	40	120
	CDSC 3	40	200
II (CDSC)	CDSC 4	80	60
	CDSC 5	80	120
	CDSC 6	80	200
III (CDSC)	CDSC 7	120	60
	CDSC 8	120	120
	CDSC 9	120	200

Ciclo	Ensaio	Trajatória dos Ciclos de Umedecimento e Secagem
I (CDSC)	I.1	$s=60 \rightarrow s=0 \rightarrow s=60$
	I.2	$s=60 \rightarrow s=0 \rightarrow s=120$
	I.3	$s=60 \rightarrow s=0 \rightarrow s=200$
II (CDSC)	II.1	$s=60 \rightarrow s=0 \rightarrow s=60 \rightarrow s=0$
	II.2	$s=60 \rightarrow s=0 \rightarrow s=120 \rightarrow s=0$
	II.3	$s=60 \rightarrow s=0 \rightarrow s=200 \rightarrow s=0$