

4 Equipamentos, Rotinas e Programas de Ensaio

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram executados ensaios de caracterização do solo e resistência. A resistência saturada do solo foi obtida de ensaios de cisalhamento direto convencional em amostras indeformadas submersas. Para analisar a influência da sucção na resistência ao cisalhamento foi executado um programa de ensaios de resistência em uma prensa de cisalhamento direto com controle de sucção. Todos esses ensaios supracitados foram realizados segundo técnicas e rotinas de execução que garantiram a sua repetibilidade. A seguir, são descritos tais rotinas e técnicas usadas no programa experimental.

4.1 Ensaio de Caracterização

4.1.1 Caracterização Física

Para a determinação das propriedades-índices básicas das amostras de solo estudadas, foram realizados ensaios de caracterização física. Tal caracterização foi feita no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC – Rio, utilizando amostras deformadas e indeformadas. Os procedimentos seguem as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), citadas a seguir:

- ➔ NBR 6457/1986 – Amostra de Solos – Preparação para Ensaio de Compactação e Caracterização;
- ➔ NBR 6457/1986 – Teor de Umidade Natural;
- ➔ NBR 6508/1984 – Massa Específica Real dos Grãos;
- ➔ NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- ➔ NBR 7180/1988 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade;
- ➔ NBR 7181/1988 – Solo – Análise Granulométrica.

A partir das amostras indeformadas dos diversos ensaios realizados, foram determinadas outras propriedades índices, como:

- Peso específico real dos grãos, $\gamma_s = \rho_s \cdot g$, sendo ρ_s a massa específica dos grãos e g a aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$);
- Peso específico natural, $\gamma_{nat} = \rho_{nat} \cdot g$. Onde ρ_{nat} é a massa específica natural;
- Peso específico seco, $\gamma_d = \gamma_{nat}/(1 + w_{nat})$, sendo w_{nat} a umidade natural do solo;
- Índice de vazios (e), obtido pela correlação de índices $e = \gamma_s/\gamma_d - 1$;
- Porosidade (n , %), também obtida por correlação de índices, sendo $n = e/(1 + e)$;
- Grau de saturação (S , %), por fórmula de correlação, $S = \rho_s \cdot w_{nat}/e \cdot \rho_w$; sendo ρ_w a massa específica da água a 4° C ($\rho_w = 1 \text{ Mg/m}^3$).

Os resultados da caracterização física do solo permitem, ainda, classificar o solo de algumas maneiras, sendo que a classificação usada nesse trabalho segue o sistema unificado de classificação de solos (SUCS). Este sistema de classificação foi desenvolvido por Arthur Casagrande em 1948 para obras de aeroportos, sendo que o seu uso foi expandido para todas as áreas da Geotecnia. Essa classificação está apresentada no capítulo 5.

4.1.2 Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica de solos tropicais é importante, uma vez que, em alguns casos, sua mineralogia pode influenciar em seu comportamento mecânico. Segundo Souza Neto e Lacerda (2001) citado por Brant (2005), a mineralogia do material pode ser tão ou mais importante que os índices físicos, em alguns casos de correlações, resultando em grande dispersão, quando tal caracterização não é levada em conta. Os autores afirmam, ainda, que o maior problema em se estabelecer correlações é o reduzido número de dados disponíveis na literatura.

O tipo de argilomineral constituinte do solo é um parâmetro controlador do tamanho, forma e características superficiais de suas partículas, assim como sua expansibilidade, plasticidade e resistência (Mitchell, 1993).

A composição qualitativa das diversas frações do solo foi determinada através de observação na lupa binocular e de difrações de raios-X. As frações pedregulho e areia foram analisadas na lupa binocular. As difrações de raios-X foram realizadas pelo método do pó em amostras total e das frações silte e

argila. A preparação das amostras foi feita por peneiramento. A Tabela 4.1 apresenta o resumo das amostras utilizadas nesta caracterização.

Tabela 4.1 – Amostras para caracterização mineralógica.

Amostra	Passante na peneira nº.	Abertura da malha (mm)	Retido na peneira nº.	Abertura da malha (mm)
Total	40	0,420	-	-
Pedregulho	8	2,380	10	2,000
Areia	10	2,000	200	0,074
Silte	200	0,074	400	0,037
Argila	400	0,037	-	-

Após esta preparação, foram realizadas as observações na lupa binocular do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC – Rio, a fim de determinar a composição mineralógica das frações pedregulho e areia do solo. Posteriormente, as mesmas amostras foram analisadas no Laboratório de Análise de Materiais e Tratamento Térmico do Departamento de Ciências de Materiais e Metalurgia da PUC – Rio, onde se obteve as fotos apresentadas no capítulo 5.

As análises de difração de raios-X nas amostras de rocha, SR1 e SR2 (frações de silte e argila) foram executadas no Laboratório de Difractometria de Raios-X do Departamento de Geologia da UFRJ. O equipamento utilizado foi um Difractômetro Rigaku-Termoflex, modelo 2013, com contador proporcional, 40 KV, 30 mA; tubo de cobre, filtro de níquel, velocidade de varredura de 1º/min.

As análises nas amostras de SR3 e SR2 (amostra total, em estado natural e aquecida) foram realizadas no Laboratório de Difractometria de Raios-X do DCMM da PUC - Rio. Utilizou-se um Difractômetro Siemens, modelo D5000. A velocidade de varredura foi de 1,2º/min.

Algumas amostras foram tratadas para confirmar as análises de difração. Foram obtidas duas lâminas da amostra total e das frações silte e argila para a amostra de rocha e de solo SR1. As frações foram separadas por sedimentação. Uma lâmina de cada amostra foi saturada em etilenoglicol, sendo estas colocadas em um dessecador de vidro contendo tal substância por 24h. As outras lâminas foram aquecidas em mufla a uma temperatura de 550º C. A amostra total de solo SR2 apenas foi aquecida a 350º C em forma de pó.

A identificação dos minerais foi feita pela determinação dos picos obtidos pela difração dos raios-X e registrados em gráficos, correspondendo a vários ângulos de um goniômetro, a partir do quais o espaçamento cristalográfico dos minerais pode ser calculado pela Lei de Bragg (equação 4.1).

$$n\lambda = 2d \cdot \text{sen}(\theta) \quad (4.1)$$

onde n é um número inteiro, positivo e diferente de zero; λ é o comprimento de onda do feixe de raios-X; d é a distância entre camadas atômicas em um cristal, isto é, a distância interplanar basal do mineral; e θ é o ângulo de incidência do feixe de raios-X.

Nas análises feitas na UFRJ, os picos foram determinados através de tabelas nas quais o espaçamento é apresentado em função do seu ângulo. Já nos difratogramas obtidos no DCMM – PUC – Rio, a identificação dos picos foi realizada através de análises quantitativas pelo software TOPAS da Bruker AXS.

4.1.3 Caracterização Química

A fim de se analisar as características químicas dos solos estudados, assim como da amostra de rocha, foram feitas análises químicas, total e parcial, assim como a determinação do pH e perda ao fogo.

A análise química total foi feita pelo Laboratório de Fluorescência e Difração de Raios-X do Departamento de Geologia da UFRJ, utilizando o método de pastilhas fundidas com fluxo (tetra/meta) de tetraborato de lítio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), diluição de 1:5, num espectrômetro PW 2400, da marca Phillips. O software utilizado para as análises semi-quantitativas foi o Squant14, acompanha o equipamento e foi desenvolvido pelo fabricante do mesmo. Desta análise foi possível quantificar os teores de óxidos de silício, alumínio, titânio, ferro, manganês, magnésio, potássio e zircônio das amostras.

Ainda no Laboratório da UFRJ citado anteriormente, foi determinada a perda ao fogo das amostras de solo e rocha, com exceção do SR3. As amostras foram pesadas antes e depois de serem levadas à mufla a 950° C por 30 min. Com os resultados dessa análise pode-se correlacionar o grau de intemperismo das amostras.

Nas análises químicas parciais, apenas os minerais secundários são decompostos, como os argilominerais, óxidos cristalinos de ferro e de alumínio e amorfos. Esses minerais são representativos das frações finas do solo, responsáveis, principalmente por sua atividade.

Do ataque sulfúrico, foram determinados os teores de óxidos de silício (Si_2O), alumínio (Al_2O_3), ferro (Fe_2O_3), titânio (TiO_2) e potássio (K_2O), dados em porcentagem. Já o complexo sortivo, se refere à presença de cátions trocáveis nos solos, expressos por cmol_c/kg . Com os valores determinados nessa última análise, pode-se quantificar as porcentagens de alguns argilominerais nas amostras de solo e rocha.

Estes ensaios foram realizados no Centro Nacional de Pesquisa de Solos (CNPS/EMBRAPA), sendo que seguiram procedimentos descritos no Manual de Análise de Solo (CNPS/EMBRAPA, 1997). A determinação do pH do solo também foi feita neste centro e deste resultado foi obtido a acidez das amostras.

4.1.4 Programa de Ensaios

Foram realizadas as caracterizações supracitadas nas amostras de solos e rocha coletados. As Tabela 4.2 e Tabela 4.3 resumem os ensaios e assinalando em quais amostras estes foram executados.

Tabela 4.2 – Resumo do programa experimental de Caracterização Física.

Amostra	Teor de Umidade Natural	Massa específica dos grãos	Limites de Atterberg	Granulometria
SR1	X	X	X	X
SR2	X	X	X	X
SR3	X	X	X	X
Rocha	-	-	-	-

Tabela 4.3 – Resumo do programa experimental de Caracterização Mineralógica e Química.

Amostra	Caracterização Mineralógica		Caracterização Química	
	Lupa Binocular	Difração de Raios-X	Análise Química total	Análise Química Parcial
SR1	X	X	X	X
SR2	X	X	X	X
SR3	X	X	X	X
Rocha	-	X	X	X

4.2 Ensaio para Obtenção da Curva Característica de Retenção de Água

Como dito anteriormente, as curvas características dos solos residuais foram obtidas pelo do método do papel filtro (de Campos *et al.* 1992; Marinho 1994 e 1997; Villar 2002; Moncada 2004). Os aspectos teóricos e históricos

do ensaio e, também, a importância de obter a relação entre a sucção e a umidade dos solos não saturados estão descritos no capítulo 2. A seguir as rotinas e técnicas de ensaio adotadas são apresentadas.

4.2.1 Rotinas e Técnicas de Ensaio

Inicialmente, as dimensões dos anéis moldadores foram obtidas, ou seja, altura e diâmetro, assim como a massa. Foram confeccionados 10 corpos de prova para cada curva característica, obtendo-se o respectivo teor de umidade de campo. Após a moldagem, cada anel era embalado com filme de PVC e papel alumínio, para não ocorrer perda de umidade.

Depois de determinado o teor de umidade, 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, os pontos experimentais seriam representativos. Vale lembrar que nesse procedimento, os corpos de prova partiram da sua umidade natural, assim, caso necessitasse iam ser umedecidos ou secos.

O umedecimento foi feito adicionando água e posteriormente pesando os corpos de prova. Quando se fez necessário diminuir a umidade do solo, o mesmo foi realizado deixando o corpo de prova secando ao ar. Depois, os anéis foram embrulhados com filme de PVC e papel alumínio, novamente, para não perder umidade. Estes foram colocados em uma caixa de isopor fechada por 48 horas para que a umidade se distribuísse uniformemente por todo solo dentro do anel.

Passado esse tempo, os papéis-filtro foram colocados em contato com o solo no topo e na base de cada anel, uma vez que se desejava obter a sucção mátrica. Salienta-se que os papéis filtro foram utilizados diretamente da caixa. Novamente, os anéis eram bem isolados do ambiente, isto é, 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. Ressalta-se que nessa etapa deve-se prestar muita atenção, já que o intervalo de tempo é muito pequeno.

Então, os papéis-filtro e os corpos de prova foram secos em estufa com temperatura entre 100 e 110° C por no mínimo 2 horas (Marinho 1997). O

procedimento de pesagem do filme de PVC seco foi idêntico ao de pesagem do papel-filtro úmido. Os corpos de prova secos também foram pesados.

Com os dados obtidos montava-se um gráfico de variação de peso do papel filtro *versus* raiz do tempo. A partir de interpolações para o tempo zero, obteve-se a massa inicial do papel filtro. Observou-se que o comportamento dessas curvas, tanto para ganho de umidade quanto para perda, foi muito variável.

Determinava-se a umidade dos papéis filtro, a sucção correspondente e o teor de umidade do solo. Após obter a curva característica, verificou-se a necessidade ou não de novos pontos a fim de melhorar o aspecto da curva determinada.

4.2.2 Programa de ensaios

Foram realizadas determinações de curva característica de sucção para cada um dos solos estudados. A Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6 resumem as características iniciais dos corpos de prova usados, assim como a trajetória de secagem ou umedecimento seguida. O teor de umidade indicado foi o volumétrico.

Tabela 4.4 – Pontos para a curva característica do solo SR1.

Ponto	Trajectoria	θ inicial (%)	θ final calculada (%)	Massa inicial do corpo de prova (g)	Adição/R etirada de água (mL)	θ final obtida (%)
1	umidade natural	24,94	24,94	87,14	0,00	23,90
2	secagem	25,66	2,00	96,76	-9,41	1,32
3	secagem	21,89	8,23	97,26	-7,53	8,02
4	secagem	18,30	14,46	97,67	-3,79	8,13
5	secagem	20,22	20,69	82,31	-1,12	12,35
6	umedecimento	16,82	26,93	88,33	2,09	25,81
7	umedecimento	19,71	33,16	84,84	3,99	31,83
8	umedecimento	21,45	39,39	88,41	5,19	39,82
9	umedecimento	20,64	45,62	86,46	8,34	44,31
10	umedecimento	22,58	51,85	85,48	9,64	48,81

Tabela 4.5 – Pontos para a curva característica do solo SR2.

Ponto	Trajectoria	θ_{inicial} (%)	θ_{final} calculada (%)	Massa inicial do corpo de prova + anel (g)	Adição/Retirada de água (mL)	θ_{final} obtida (%)
1	umidade natural	27,18	27,18	91,48	0,00	25,67
2	secagem	28,87	2,00	92,20	-9,41	1,73
3	secagem	27,28	7,88	91,15	-7,53	6,60
4	secagem	27,35	13,75	91,42	-3,79	18,89
5	secagem	27,04	19,63	91,96	-1,12	11,01
6	umedecimento	26,69	25,51	91,96	2,09	24,95
7	umedecimento	28,02	31,39	91,27	3,99	30,54
8	umedecimento	28,25	37,26	88,95	5,19	35,23
9	umedecimento	27,27	43,14	90,01	8,34	42,03
10	umedecimento	27,63	49,02	91,81	9,64	47,16
11	umedecimento	26,81	27,18	99,65	0,15	28,53
12	umedecimento	27,07	31,03	101,89	1,57	26,30

Tabela 4.6 – Pontos para a curva característica do solo SR3.

Ponto	Trajectoria	θ_{inicial} (%)	θ_{final} calculada (%)	Massa inicial do corpo de prova + anel(g)	Adição/Retirada de água (mL)	θ_{final} obtida (%)
1	umidade natural	11,80	11,80	69,18	0,00	9,30
2	secagem	15,45	0,74	72,77	-5,29	12,72
3	secagem	14,49	6,14	72,89	-2,97	32,87
4	secagem	12,45	11,55	71,32	-0,33	48,50
5	umedecimento	13,28	16,95	71,51	1,33	44,74
6	umedecimento	14,80	22,35	70,55	2,73	52,39
7	umedecimento	15,72	27,75	72,25	4,33	43,43
8	umedecimento	15,98	33,16	73,76	6,14	43,66
9	umedecimento	34,11	38,56	108,17	1,75	32,95
10	umedecimento	15,91	43,96	72,63	9,95	48,86
11	umedecimento	14,09	45,33	70,64	11,22	45,33
12	umedecimento	14,09	42,75	70,64	10,30	42,75
13	secagem	10,51	6,73	60,23	-1,37	6,73
14	umedecimento	12,14	15,90	71,71	1,38	15,90
15	secagem	13,26	1,11	72,61	-4,38	1,11
16	umedecimento	12,68	19,60	73,58	2,54	19,60
17	umedecimento	5,10	24,00	68,17	6,67	24,44
18	umedecimento	7,99	25,00	66,76	6,09	25,44

4.3

Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

4.3.1

Equipamento

Para a obtenção dos parâmetros de resistência do solo saturado foram realizados ensaios de cisalhamento direto convencional no Laboratório de Geotecnia da EEUFMG em uma prensa convencional da marca Wykeham

Farrance. O monitoramento do ensaio é feito manualmente. Os ensaios foram executados pelo bolsista de iniciação científica Fábio Campos. A figura 4.1 mostra o equipamento utilizado.

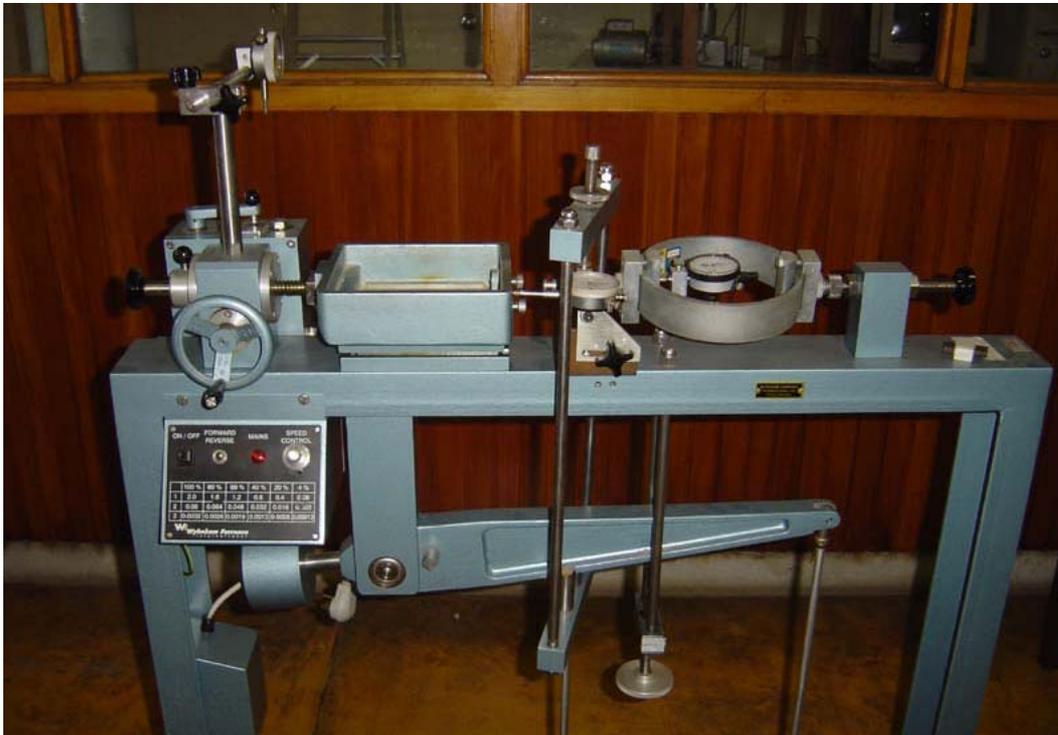


Figura 4.1 – Prensa de cisalhamento direto convencional do Laboratório de Geotecnia da EEUFMG.

4.3.2 Rotinas e Técnicas de Ensaio

Nos ensaios de cisalhamento direto convencional, inicialmente, foram verificadas as condições de funcionamento do equipamento, certificando que todos os instrumentos de monitoramento estavam ajustados e funcionando corretamente. Em seguida, o procedimento de montagem e execução do ensaio é o mesmo descrito na norma técnica da ASTM D 3080 (1990).

Os ensaios executados foram drenados e a amostra inundada antes de aplicar a tensão normal. A velocidade de cisalhamento adotada foi de 0,048 mm/min, calculada de acordo com a proposta de Bishop e Henkel (1962). Os cálculos usados na determinação da velocidade estão mostrados no apêndice B.

Foi imposto o deslocamento horizontal à velocidade constante de 0,048 mm/min até que o mesmo atingisse aproximadamente 15 mm, o limite de

deslocamento da prensa usada. Depois de encerrado o ensaio, o teor de umidade final da amostra foi obtido.

4.3.3 Programa de Ensaios

O programa de ensaios de cisalhamento direto convencional consistiu em uma série de 3 ensaios saturados com amostras de solo indeformado. Tais ensaios foram executados para a determinação da resistência saturada do solo, em função dos seus parâmetros efetivos. Este ensaio foi chamado de CD (Cisalhamento Direto). A Tabela 4.7 mostra a nomenclatura e a tensão normal usada, sendo que as tensões normais aplicadas foram, aproximadamente, 50 (CD01), 100 (CD02) e 200 kPa (CD03).

Tabela 4.7 – Ensaios de cisalhamento direto convencional.

Ensaio	Tensão Normal (kPa)
CD01	50
CD02	100
CD03	200

4.4 Ensaios de Cisalhamento Direto com Sucção Controlada

4.4.1 Equipamento

Para a análise da influência da sucção na resistência ao cisalhamento do solo, foram realizados ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada (CDSC). Foi utilizado um equipamento da PUC – Rio desenvolvido a partir de um projeto elaborado por de Campos no final da década de 80 mediante adaptação de prensa de cisalhamento direto convencional. Detalhes do equipamento e resultados de ensaios podem ser vistos em Fonseca (1991), Delgado (1993), Delgado *et al.* (1994), de Campos e Delgado (1995), Beneveli (2002), Beneveli e de Campos (2004), Soares e de Campos (2004), Soares (2005). Na figura 4.2 apresenta-se um esquema geral deste equipamento e na Figura 4.3 um esquema da câmara de compressão. A Figura 4.4 mostra o equipamento após da montagem de um ensaio.

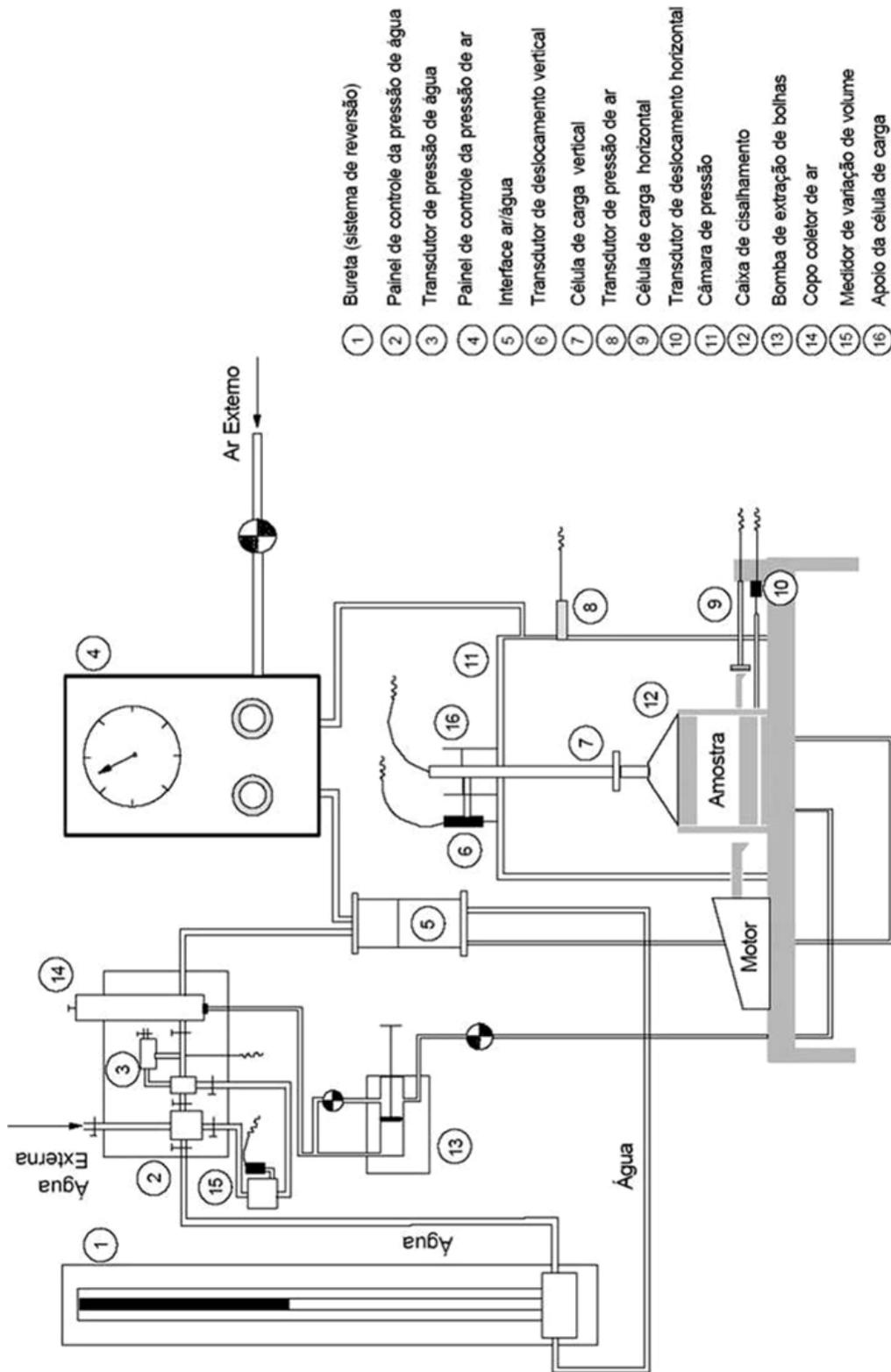


Figura 4.2 – Esquema Geral do Equipamento de CDSC (adaptado de Fonseca, 1991).

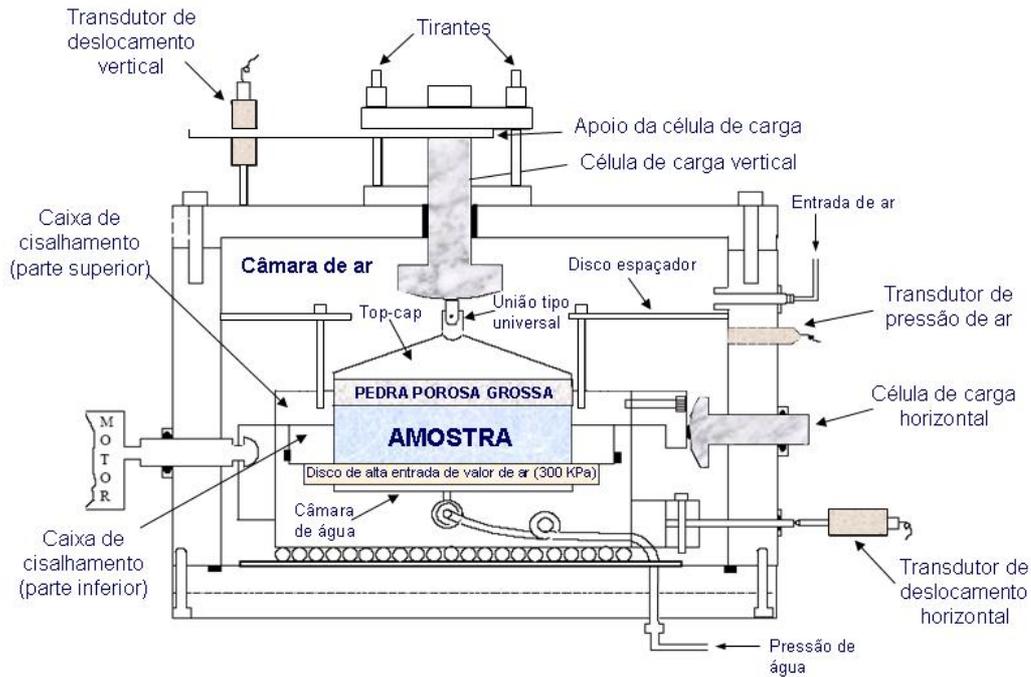


Figura 4.3 – Câmara de compressão do equipamento de cisalhamento direto com sucção controlada da PUC – Rio (Adaptado de Fonseca, 1991).



Figura 4.4 – Equipamento de cisalhamento direto com sucção controlada da PUC - Rio.

4.4.2 Rotinas e Técnicas de Ensaios

A preparação do equipamento requer algumas operações preliminares, sendo elas: a calibração dos transdutores de pressão, dos LSCDT's, das células de carga, bem como do braço de alavanca para a aplicação da carga vertical, a saturação das linhas de aplicação de contrapressão, a saturação do disco cerâmico de alta entrada de ar (DAVE), de 500 MPa de valor de entrada de ar, e a detecção de possíveis pontos de vazamentos. Outra operação importante foi a preparação do corpo de prova e a instalação do mesmo na caixa de cisalhamento.

Os transdutores de pressão, os LSCDT's, as células de carga e o braço de alavanca de aplicação de carga vertical foram calibrados antes de se iniciar o programa experimental. Tais procedimentos, as curvas e as constantes de calibração estão apresentados no apêndice A.

As linhas de contrapressão foram saturadas por percolação de água deaerada e, após a saturação, as bolhas de ar que ainda estavam no sistema foram retiradas com o auxílio da bomba de extração de ar. A extração de bolhas foi realizada sempre que se iniciava um novo ensaio. Quando a prensa não estava sendo usada, o disco cerâmico ficou coberto por uma camada de água destilada a fim de evitar a sua desaturação. A saturação do DAVE é importante, uma vez que assegura a existência de uma coluna de água contínua entre o corpo de prova e a câmara de água. No apêndice A, detalha-se esse procedimento de saturação e apresenta-se a curva de saturação, assim como o valor do coeficiente de permeabilidade do disco, determinado durante esse processo.

Outro procedimento realizado antes do início do programa de ensaios foi a detecção de possíveis pontos de vazamento. A verificação foi realizada conforme proposto por Delgado (1993), elevando a pressão de água a um valor maior que aquele usado nos ensaios. Pequenos trechos foram isolados e verificados progressivamente, fechando e abrindo as válvulas de controle. O procedimento realizado é mostrado na Figura 4.5. Caso existissem vazamentos, o sistema de medição de variação volumétrica (bureta graduada com sistema de reversão) variaria a sua leitura.

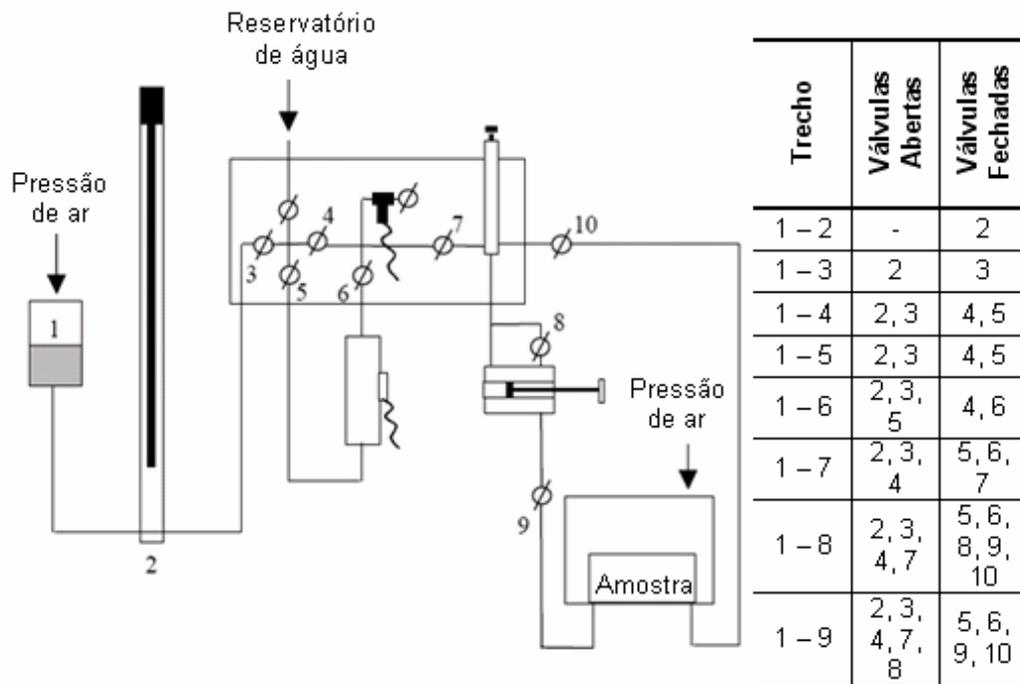


Figura 4.5 - Procedimento para a detecção de vazamentos (Adaptado de Delgado, 1993).

A preparação dos corpos de prova usados nos ensaios foi realizada em um ambiente com temperatura e umidade constantes. Esses foram obtidos de bloco indeformado, moldando-os com o auxílio de um anel biselado quadrado com lados medindo 100 mm e altura, 21,6 mm.

Em alguns corpos de prova, equalização de sucção iniciou-se fora da câmara de compressão, em um dessecador com uma solução salina, levando em consideração a relação entre a concentração de soluto nessa solução salina e a umidade relativa (Robinson, 1945, *apud* Marinho, 1994). Após a moldagem, o corpo de prova era colocado num dessecador 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 desejado e foi aplicado 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 4.2 (Marinho, 1994) determina-se a concentração de soluto. Na Tabela 4.8 encontra-se as sucções e concentrações de soluto usadas neste trabalho.

$$sucção = 4598,95 \times m^{1,00122} \quad (4.2)$$

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

Tabela 4.8 – Concentrações de soluto para as sucções dos ensaios de CDSC.

Sucção (kPa)	Molaridade (mol/g)	Concentração (g/L)
25	0,0055	0,32
50	0,0109	0,64
100	0,0218	1,28
200	0,0437	2,55
Peso molar de NaCl = 58,44 g/mol		

Os corpos de prova não submetidos a tal procedimento de equalização de sucção no dessecador, após a moldagem foram embalados em papel filme e papel alumínio e colocados em uma caixa de isopor durante 24h para a uniformização da umidade dos mesmos.

A montagem do ensaio foi executada rapidamente. Assim, antes de transferir a amostra para a caixa de cisalhamento, retirou-se a parte superior da caixa e ajustou-se os LSCDTs e o medidor de variação volumétrica, colocando-os em suas marcas zero. Como dito anteriormente, foi verificado se existiam bolhas de ar no sistema de aplicação de pressão, eliminando-as quando necessário.

A água sobre a pedra porosa de alta pressão de entrada de ar era retirada e ela era, então, seca com um papel toalha. Segundo Lins (1991) citado por Soares (2005), ao secar com um papel absorvente a pedra porosa fina o tempo de equalização da sucção tende a diminuir. Um papel filtro úmido era, então, colocado sobre a mesma. Depois, colocou-se a caixa de cisalhamento sobre uma placa de vidro e posicionando a amostra adequadamente, assentou-a cuidadosamente na caixa. A caixa era novamente colocada sobre a base com a pedra porosa de alta entrada de ar e, sobre a amostra, um papel filtro e a pedra porosa grossa, que é responsável pela distribuição da 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 quepe metálico superior.

Foram retirados os parafusos que unem as duas metades da caixa de cisalhamento. Com o auxílio de um disco e quatro parafusos espaçadores, levantou-se a parte superior da caixa. A distância entre as metades foi medida através de extensômetros colocados no disco, sendo que tal deslocamento foi 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 já deve estar 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, as válvulas para a aplicação da pressão de água eram abertas, os pesos para a aplicação da carga vertical, colocados. Essa seqüência deve ser obedecida a fim de evitar danos à pedra porosa DAVE e executada o mais rápido possível, com pequenos intervalos de tempo entre a aplicação de cada pressão, evitando assim perturbação da amostra.

No decorrer de todo o ensaio, as pressões de ar e água e a carga vertical foram monitoradas e mantidas constantes. Ressalta-se que assim que estas foram aplicadas, observava-se o início do fluxo de água para dentro ou fora do corpo de prova, dependendo se a sucção aplicada no ensaio corrente foi maior ou menor que o valor de sucção inicial respectivamente. Uma vez que a equalização da sucção ocorre mais lentamente que a estabilização do deslocamento vertical, a fase de adensamento foi estendida até a estabilização da sucção, isto é, quando não há mais fluxo de água na amostra, ou quando esse fluxo ocorre com uma velocidade constante.

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 $0,1\text{cm}^3$). Logo em seguida a amostra foi cisalhada com velocidade constante e igual a $0,000975\text{ mm/min}$, calculado por um procedimento proposto por Ho e Fredlund (1982). A velocidade foi calculada para obter um ensaio drenado. Todos os conceitos, procedimentos e cálculos usados para a obtenção da velocidade de cisalhamento estão apresentados no apêndice B.

Devido à baixa velocidade do ensaio, acompanhava-se o desenvolvimento da curva τ vs δh diariamente, sendo que se considerava o final do ensaio quando tal curva atingiu uma inclinação constante. Novamente, fazia-se uso da bomba de extração de bolhas e o volume extraído era quantificado, após desligar a prensa. Em seguida, 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.

4.4.3 Programa de Ensaio

Foram propostos 12 ensaios para a obtenção da envoltória de resistência não saturada do solo. Em cada ensaio, as pressões de ar, de água e carga vertical eram variadas para obter as variáveis de tensões que descrevem o comportamento do solo. No decorrer do trabalho, foi necessária a repetição de 3 deles. Tabela 4.9 resume os ensaios propostos e executados no presente trabalho, indicando as tensões que foram aplicadas em cada um deles.

Tabela 4.9 – Ensaio de cisalhamento direto com sucção controlada.

Série	Ensaio	Tensão Normal Líquida (kPa)	Sucção Mátrica (kPa)
I	CDSC01	50	25
	CDSC02		50
	CDSC03		100
	CDSC04		200
II	CDSC05	100	25
	CDSC05(2)		25
	CDSC06		50
	CDSC06(2)		50
	CDSC07		100
	CDSC08		200
III	CDSC09	200	25
	CDSC10		50
	CDSC10(2)		50
	CDSC11		100
	CDSC12		200

() número do ensaio