

4

Técnicas e Programa de Ensaios

4.1.

Rotinas e Técnicas de Ensaio

A seguir é feita uma descrição das rotinas e técnicas utilizadas na realização dos ensaios de cisalhamento direto convencional, de cisalhamento direto com sucção controlada, de compressão diametral e do ensaio para a determinação da curva característica através do método do papel filtro.

4.1.1.

Ensaio de Cisalhamento Direto com Sucção Controlada

Antes de se iniciar os ensaios, são necessárias algumas operações preliminares para a garantia do bom funcionamento do equipamento. Entre elas estão as calibrações dos instrumentos elétricos, a saturação do disco cerâmico de alto valor de entrada de ar, a saturação das linhas de contra-pressão, a detecção de vazamentos e a instalação do corpo de prova na caixa de cisalhamento.

A calibração dos instrumentos elétricos é um aspecto de grande importância, uma vez que a qualidade dos dados obtidos irá depender de uma boa calibração. Também se faz necessária a calibração do braço de alavanca utilizado para a aplicação da carga vertical. As curvas de calibração dos instrumentos utilizados e suas constantes, bem como o procedimento de calibração executado, são apresentados no apêndice A.

A saturação do disco cerâmico visa garantir uma coluna de água contínua entre o corpo de prova e a câmara de água. Cobrindo com água deaerada o disco cerâmico, provoca-se um fluxo forçado de água no interior do mesmo, através da aplicação de um pequeno diferencial de pressão entre a câmara de compressão e a câmara de água. Considera-se saturado o disco cerâmico quando a vazão de água, medida através do medidor de variação volumétrica, fica constante ao longo do tempo. O procedimento e o gráfico correspondente à saturação do DAVE, assim como o coeficiente de permeabilidade do mesmo, também estão apresentados no apêndice A.

As linhas de contra-pressão foram saturadas e as eventuais bolhas de ar que por ventura ainda permanecem no sistema, são removidas com o auxílio da bomba de extração de bolhas. Esse procedimento foi feito sempre que se iniciava um novo ensaio. Sempre que o equipamento não estava em uso, colocava-se uma camada de água deaerada sobre disco cerâmico a fim de evitar a sua desaturação.

Para a detecção de eventuais vazamentos que podem ocorrer nas conexões existentes no equipamento CDSC, Delgado (1993) propôs que tal verificação deve ser realizada elevando a pressão na interface ar/água até um valor maior do que os que serão utilizados nos ensaios. Depois disso, a verificação é feita isolando pequenos trechos de forma progressiva através das válvulas de controle de drenagem. Esse procedimento é exemplificado na figura 27. Caso ocorra algum vazamento, o sistema de medição de variação de volume (bureta graduada com sistema de reversão) irá acusar.

Depois de terminadas as etapas preliminares, partiu-se para a moldagem e instalação do corpo de prova na caixa de cisalhamento. Estas etapas foram efetuadas de maneira similar a do ensaio com o equipamento de cisalhamento convencional. Foi utilizado um anel moldador biselado, de secção quadrada de 100mm de lado e 21,8mm de altura, para a moldagem dos corpos de prova a partir dos blocos indeformados. Para a uniformização da umidade da amostra, os corpos de provas foram embalados com papel plástico e alumínio e depois colocados em uma caixa de isopor, sendo lá mantidos por pelo menos 24 horas.

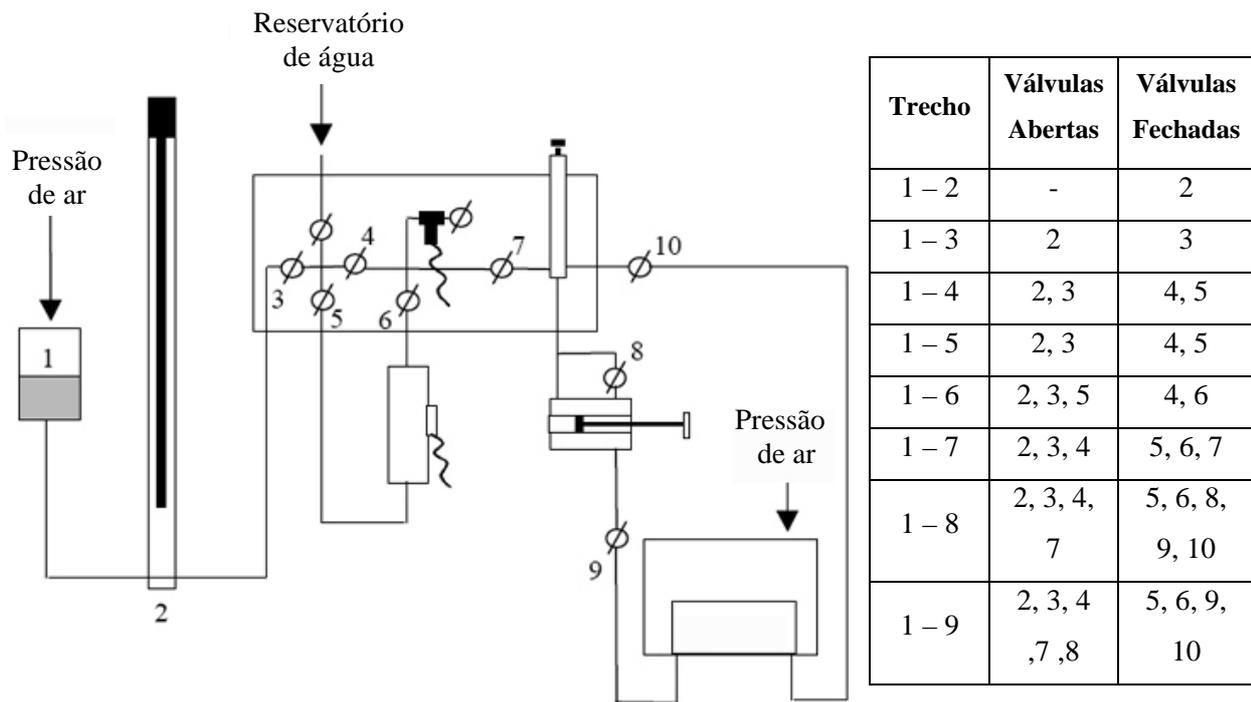


Figura 27: Procedimento para detecção de vazamentos

A instalação do corpo de prova na caixa de cisalhamento se iniciou com a retirada da água sobre o disco cerâmico, seguida de uma secagem do mesmo com um papel toalha. Segundo Lins (1991), esse procedimento diminui o tempo de estabilização da sucção a qual a amostra é submetida. Depois disso, um papel filtro úmido era colocado sobre o disco cerâmico seguido da amostra de solo, de um papel filtro seco, da pedra porosa de granulação grossa para a distribuição uniforme da pressão de ar e o *top-cap* metálico. Logo após, partiu-se para a separação das duas partes da caixa de cisalhamento. Para isso foi utilizado o disco espaçador com quatro parafusos onde dois extensômetros mecânicos mediram a separação desejada de 0,5mm. Depois, os extensômetros são retirados e a câmara de compressão é fechada tendo o cuidado para que a união universal assente corretamente sobre o *top-cap* metálico.

Depois de realizadas as etapas anteriores, parte-se para a fase de adensamento da amostra. Inicialmente, os níveis de água da interface ar/água e do copo de coleta são ajustados nas marcas zero. Isso é feito sob a pressão de água usada no ensaio (contra-pressão). Logo após, aplica-se a pressão de ar, a pressão

de água e a força vertical na amostra, nessa mesma ordem, para não ter o risco de trincar o disco cerâmico. O intervalo entre a aplicação dessas pressões deve ser o menor possível para que não haja distúrbios na amostra. As pressões de ar e de água foram mantidas constantes durante todo o ensaio e assim que estas foram aplicadas, começou a ocorrer fluxo de água para dentro ou para fora da amostra, dependendo do valor de sucção aplicado ser, respectivamente, menor ou maior que a sucção inicial do corpo de prova.

A sucção induzida é considerada atingida quando não existe mais fluxo de água na amostra. A equalização da sucção ocorre de forma mais lenta que estabilização do deslocamento vertical, logo o adensamento é considerado terminado quando cessam o deslocamento vertical e o fluxo de água. Ao final dessa fase, realiza-se um fluxo na câmara de água, através da bomba de extração de bolhas, para extrair as possíveis bolhas de ar que possam ter atravessado o disco cerâmico.

Após o término do adensamento, a amostra foi cisalhada com uma velocidade constante de 0,0122mm/min. Essa velocidade foi definida através do procedimento proposto de Bishop & Gibson (1963), sendo este apresentado no apêndice C. Trabalhos anteriores de Fonseca (1991) e Delgado (1993), nos quais utilizaram o mesmo equipamento, também utilizaram este mesmo valor de velocidade. A prensa foi desligada quando se atingiu um deslocamento próximo à 15mm e, logo após, realizou mais uma extração e quantificação do volume de ar dissolvido. A seguir, as pressões e a tensão normal foram retiradas na ordem inversa de aplicação. Por fim, foi retirado material do topo, meio e base da amostra para a determinação da sua umidade final.

4.1.2.

Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

Nos ensaios de cisalhamento direto convencional, os corpos de prova foram instalados na caixa de cisalhamento onde foram inundados, permanecendo lá pelo período de 24 horas. Durante este tempo foi feito o acompanhamento do

deslocamento vertical das amostras para a verificação de um possível comportamento expansível. Esse comportamento não foi verificado, uma vez que as amostras não apresentaram deslocamentos verticais significativos.

Após esse período, a amostra foi adensada por 24 horas, tempo este suficiente para a estabilização dos deslocamentos verticais. O cisalhamento se deu com uma velocidade constante de 0,0122mm/min e com uma abertura da caixa de cisalhamento de 0,5mm. Esta velocidade é muito menor do que aquela calculada utilizando o procedimento proposto por Gibson & Henkel (1954), apresentado no apêndice C. Essa velocidade foi escolhida por ser a mesma adotada nos ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada. O deslocamento total permitido da caixa de cisalhamento foi de aproximadamente 15mm.

4.1.3.

Ensaio para a Determinação da Curva Característica de Sucção Utilizando o Método do Papel Filtro

Para a determinação da curva característica de sucção, foi utilizado o método do papel filtro. Aspectos históricos e teóricos do ensaio são apresentados no capítulo 2.

O papel filtro utilizado foi o Whatman N°42 usado diretamente da caixa, ou seja, com a umidade higroscópica preservada. Este procedimento difere daquele apresentado pela norma americana ASTM-D5298/92, na qual determina que o papel filtro deve ser seco em estufa por no mínimo 16 horas antes do uso. Segundo Marinho (1997), o procedimento proposto pela norma americana pode afetar as características de absorção do papel resultando na alteração da curva de calibração. Foi utilizada a curva de calibração proposta por Chandler et al. (1992) apresentada no capítulo 2. Vale lembrar que a manipulação do papel filtro foi feita sempre com o uso de luvas cirúrgica e pinça, a fim de evitar que sujeira aderisse ao papel.

A partir do bloco indeformado, foram moldados 11 corpos de prova, através da cravação de anéis de PVC com 50,40mm de diâmetro e 20,25mm de altura. Durante a moldagem de cada corpo de prova foi retirado material do topo e da base para a determinação da umidade. Com a umidade natural foi possível determinar a quantidade de água que seria necessário acrescentar ou retirar das amostras para que estas representassem graus de saturação igualmente distribuídos. Assim sendo, um corpo de prova, 1º ponto, foi mantido na umidade natural enquanto que cinco foram submetidos a uma trajetória de secagem e os outros cinco a uma trajetória de umedecimento.

Na trajetória de umedecimento, 2º ao 6º ponto, foi acrescentada água destilada que foi distribuída, de forma gradual, proporcionalmente nas faces de cada amostra. Em cada corpo de prova foi acrescentada água até se chegar ao peso desejado. Depois disso cada amostra foi embrulhada com duas camadas de papel plástico e colocada em uma caixa de isopor localizada dentro da câmara úmida do laboratório. Cada amostra permanecia lá por 48 horas, para que a umidade em seu interior entrasse em equilíbrio. Após este intervalo, papéis filtro, cortados no mesmo diâmetro da amostra, foram colocados em contato direto com o topo e com a base da amostra, e depois foram envolvidas com duas camadas de papel plástico e colocada em uma caixa de isopor.

Na trajetória de secagem, 7º ao 11º ponto, as amostras foram secas, com o auxílio de uma estufa regulada a 40°C, até que estas chegassem ao peso desejado. Após este procedimento, papéis filtro eram colocados no topo e na base da amostra e estas eram igualmente envolvidas com papel plástico e colocadas na caixa de isopor. Os procedimentos de secagem e umedecimento citados anteriormente são apresentados na tabela 5.

Tabela 5: Procedimento utilizado para a determinação da quantidade de água acrescida ou retirada seguindo as trajetórias de secagem e umedecimento da amostra.

Pontos da curva					Peso inicial	Peso corrigido	água a acrescentar (mL)
Trajetória	Ponto	θ (%)	w (%)	S (%)	$P_{\text{solo+água+anel}}$ (g)	$P_{\text{solo+água+anel}}$ (g)	
umidade natural	1	32,68	23,69	65,91	93,74	93,74	0,00
umedecimento	2	38,12	27,19	78,20	94,53	96,42	1,89
umedecimento	3	35,00	24,19	74,29	93,66	96,49	2,83
umedecimento	4	36,50	25,56	76,38	93,46	96,72	3,26
umedecimento	5	43,57	31,46	88,24	93,78	97,90	4,12
umedecimento	6	48,54	35,05	98,31	93,58	99,90	6,32
secagem	7	27,23	20,52	52,89	90,76	89,03	-1,73
secagem	8	21,78	15,43	45,01	94,77	90,07	-4,70
secagem	9	16,34	11,61	33,65	94,87	87,68	-7,19
secagem	10	10,89	7,55	23,06	96,66	87,63	-9,03
secagem	11	21,78	15,54	44,69	94,67	83,38	-11,29

O tempo de equalização da troca de água do solo com o papel filtro utilizado neste trabalho foi de 7 dias. Este é o tempo proposto pela norma americana para a determinação da sucção mátrica, sendo confirmado por Marinho (1997), Swarbrick (1995), Villar & Campos (2001), entre outros.

Decorrido esse período de equalização, a amostra foi desenrolada ao lado de uma balança com resolução de 10^{-4} g, onde foram pesados os papéis filtro. O processo de pesagem do papel filtro para a determinação da sua umidade foi proposto por Villar & Campos (2001), sendo descrito resumidamente a seguir. Assim que for retirada a última camada de papel plástico, o cronômetro é acionado e com uma pinça, tira-se o papel filtro do contato com a amostra, tendo cuidado para que não tenha partículas de solo grudadas no mesmo. Em seguida

este papel é levado à balança onde será monitorada a sua perda de umidade ao longo de 3 minutos, sendo os 2 primeiros minutos monitorados a cada 10 segundos e o último a cada 15 segundos. Com isso, pode-se obter o peso do papel filtro úmido no tempo zero através de extrapolação gráfica.

Depois dessa pesagem, cada papel filtro e cada corpo de prova são colocados em cápsulas e levados a estufa (105°C) por 24 horas para a determinação da umidade. O procedimento anterior de pesagem é repetido, mas agora o monitoramento é de ganho de umidade do papel. Através da mesma técnica de extrapolação gráfica, obtém-se o peso do papel filtro seco no tempo zero. Com o peso do papel filtro seco e úmido, determina-se a sua umidade e através da curva de calibração, calcula-se o valor da sucção mátrica. Os gráficos relativos à determinação do peso do papel filtro seco e úmido no tempo zero estão apresentados no apêndice B.

4.1.4.

Ensaio de Compressão Diametral

Na tentativa de correlacionar os valores de coesão aparente, obtidos neste trabalho, com a resistência à tração do solo não saturado, foram realizados ensaios de compressão diametral, ou *ensaio brasileiro*. A resistência à tração de um solo é uma propriedade do material que, em geral, depende da sucção presente em sua estrutura.

O ensaio foi originalmente desenvolvido na década de 50, para avaliar a resistência à tração de concreto e posteriormente foi utilizado em rochas e solos cimentados. O ensaio consiste no carregamento de um corpo de prova cilíndrico, onde são aplicadas cargas de compressão vertical, ao longo de duas placas rígidas paralelas, em posições diametralmente opostas. A ruptura da amostra acontece ao longo do plano vertical do carregamento. A figura 28 mostra o equipamento para a aplicação da compressão vertical.



Figura 28: Fotos do equipamento utilizado no ensaio de tração.

Krishhnayya & Eisenstein (1974) afirmam que o ensaio brasileiro apresenta diversas vantagens em relação a outros métodos de avaliação da resistência à tração, tais como a facilidade de preparação das amostras, a utilização de equipamento similar ao ensaio de compressão simples, ruptura relativamente insensível às condições de superfície de contato da amostra com um campo relativamente uniforme de tensões de tração perpendicular e ao longo do plano diametral.

A resistência à tração pode ser feita de forma direta através da seguinte equação (Krishhnayya & Eisenstein, 1974):

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi.d.H} \quad (14)$$

onde:

P = carga máxima de compressão;

d = diâmetro da amostra;

H = espessura da amostra.

Segundo Krishhnayya & Eisenstein (1974), esta não é uma relação rigorosamente adequada para materiais que tenham grande diferença entre os módulos de elasticidade na compressão e na tração, como os solos. Eles afirmam também que uma boa aceitabilidade do ensaio tem sido alcançada quando a distribuição da carga aplicada é feita sobre uma pequena área de contato. A figura 29 mostra a solução teórica para tensões ao longo do diâmetro vertical da amostra submetida ao ensaio de compressão diametral. Esta solução só é válida quando o solo ensaiado tiver as mesmas propriedades elásticas para a compressão e para a tração. Nesta figura, “A” é a largura da faixa carregada. Procurando levar em conta o comportamento diferenciado na tração e compressão, Krishhnayya & Eisenstein (1974) propõem um método para avaliação das propriedades de tração dos solos através do uso de uma solução numérica e ensaios de compressão simples.

Apesar dos comentários citados acima, foi feito o uso da relação (14) na avaliação da resistência à tração do solo, por se tratar de um método simples e direto.

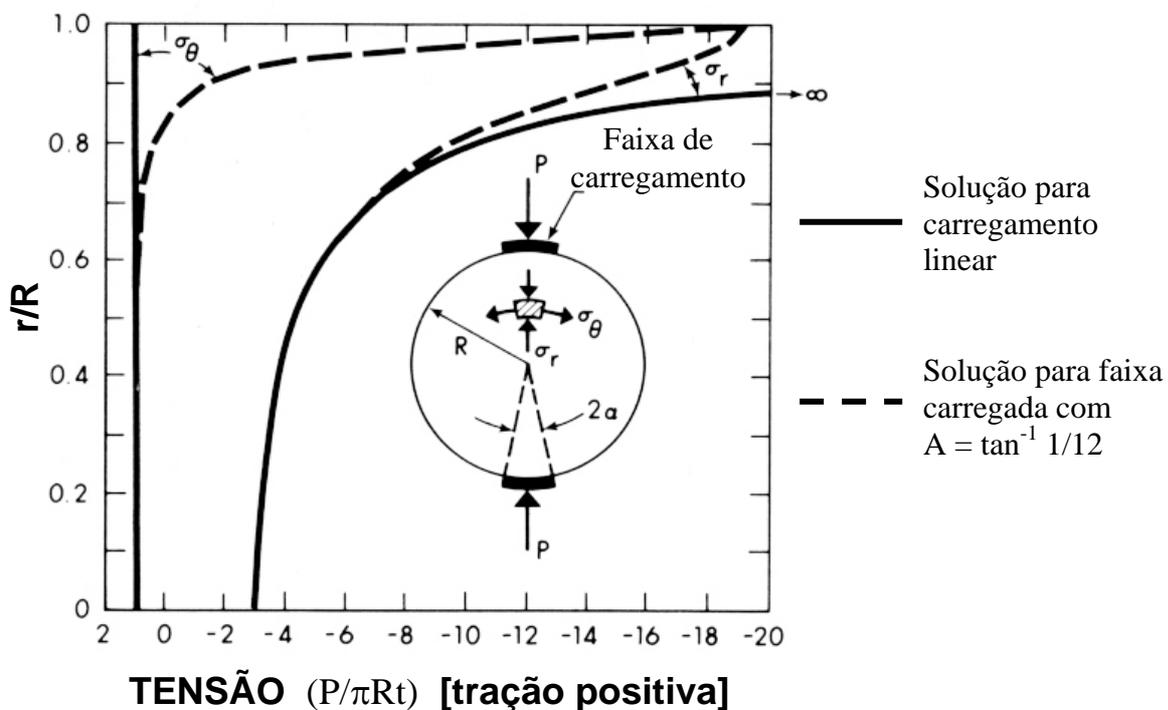


Figura 29: Soluções teóricas para tensões ao longo do diâmetro vertical de uma amostra no ensaio de compressão diametral (adaptado de Krishhnayya & Eisenstein, 1974).

As amostras foram moldadas, a partir do bloco indeformado, com 76,5mm de diâmetro e 19,8mm de altura, sendo estas preparadas com diferentes valores de umidade. Após ter sido preparada, a amostra era levada ao equipamento onde o carregamento era aplicado com uma velocidade constante de 0,305mm/min. Essa velocidade foi escolhida por ser rápida o suficiente para evitar a perda de umidade da amostra durante o carregamento axial. Durante o ensaio eram feitas leituras da força aplicada e do deslocamento vertical, a fim de se determinar a relação de tensão x deformação. Depois do rompimento da amostra, esta era pesada e levada à estufa por 24 horas para a determinação do seu teor de umidade.

4.2.

Programa de Ensaios

4.2.1.

Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

Para a determinação dos parâmetros efetivos de resistência do solo saturado, foi realizado um total de 4 ensaios de estagio único em amostras submersas com valores aproximados de 50, 102, 150 e 200kPa de tensão normal aplicada.

CD = Cisalhamento Direto

Tabela 6: Nomenclatura dos ensaios de cisalhamento direto convencional executados e pressões aplicadas.

Ensaio	Tensão normal (kPa)
CD 1	50
CD 2	102
CD 3	150
CD 4	200

4.2.2.

Ensaio de Cisalhamento Direto com Sucção Controlada

Foi realizado um total de 19 ensaios, agrupados em 4 séries distintas. Na primeira série manteve-se constante a tensão normal líquida ($\sigma-u_a$) em torno de 50 kPa, e variou a sucção mátrica aplicada em cada ensaio de valores aproximados de 25, 50, 100, 150 e 200kPa.

Na segunda série manteve-se constante a tensão normal líquida ($\sigma-u_a$) em torno de 100kPa, e variou a sucção mátrica em cada ensaio dos mesmo valores.

Na terceira série foi utilizado o mesmo procedimento, só que agora foi mantida constante a tensão normal líquida ($\sigma-u_a$) em torno de 200 kPa.

A quarta e última série, foi destinada ao estudo da influência da velocidade de cisalhamento nos parâmetros de resistência. Para isso foram realizados 4 ensaios onde manteve-se constante a tensão normal líquida ($\sigma-u_a$) em torno de 100kPa e variou a sucção mátrica aplicada em cada ensaio de valores aproximados de 50, 100, 150 e 200kPa. Com isso foi possível comparar as envoltórias de resistência obtidas das séries 2 e 4. A velocidade de cisalhamento utilizada nesta série de ensaios foi de 0,00488mm/min, sendo esta equivalente a 2,5 vezes menor que a velocidade utilizada nos demais ensaios. A tabela 7 apresenta as 4 séries realizadas com as respectivas pressões aplicadas.

CDSC = Cisalhamento Direto com Sucção Controlada

Tabela 7: Nomenclatura dos ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada executados e pressões aplicadas.

Série	Ensaio	Tensão normal líquida (kPa)	Sucção mátrica (kPa)
I	CDSC 1	50	25
	CDSC 2	50	50
	CDSC 3	50	100
	CDSC 4	50	150
	CDSC 5	50	200
II	CDSC 6	100	25
	CDSC 7	100	50
	CDSC 8	100	100
	CDSC 9	100	150
	CDSC 10	100	200
III	CDSC 11	200	25
	CDSC 12	200	50
	CDSC 13	200	100
	CDSC 14	200	150
	CDSC 15	200	200
IV	CDSC 16	100	50
	CDSC 17	100	100
	CDSC 18	100	150
	CDSC 19	100	200