

## 4

### Equipamentos e metodologias de ensaio

O principal objetivo desta dissertação, como já mencionado, é avaliar o efeito do licor nas características de resistência de dois solos, um saprolítico e outro coluvionar, no estado natural e contaminado com licor cáustico. Para tanto, ensaios triaxiais CIU foram realizados com o solo residual jovem e de cisalhamento direto com o colúvio. Além dos ensaios básicos de caracterização, outros foram feitos com o intuito de auxiliar nas análises dos resultados dos ensaios triaxiais e de cisalhamento direto. Os solos contaminados foram obtidos a partir de corpos de prova percolados por licor, nos ensaios triaxiais, e “saturados” por sucção, nos ensaios de cisalhamento direto. Em todos os ensaios se buscou essencialmente avaliar as características dos solos antes e após a contaminação, por isso a maioria dos ensaios foi realizada para estas duas situações.

Características básicas do licor cáustico, como pH, teor alcalino e condutividade elétrica, também foram determinadas, sendo as metodologias utilizadas apresentadas neste capítulo.

Consta na Tabela 4.1 o resumo de todos os ensaios executados para cada solo. As metodologias utilizadas na maioria deles são detalhadas a seguir.

Tabela 4.1 – Resumo dos ensaios realizados

Solo	Caracterização física			Caracterização química						Caracterização mineralógica			Adensto. Edométrico	Ensaio de Resistência		
	G <sub>s</sub>	Granulometria	Limites de Atterberg	pH	Complexo sortivo	Química total	C.E.	Ataque Sulfúrico	Amorfos	DRX	ATD	Observação na lupa binocular		Triaxial CIU	Triaxial CID	Cisalhamento direto
Residual Natural	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-
Residual Contaminado*	-	x	x	x	x	-	-	x	x	x	x	-	-	x	x	-
Colúvio Natural	x	x	x	x	x	X	x	x	x	x	x	-	-	-	-	x
Colúvio Contaminado#	-	x	x	x	x	-	-	x	x	x	x	-	-	-	-	x

\* Obtido através dos corpos de prova percolados por licor, nos ensaios triaxiais

# Obtido a partir dos corpos de prova saturados por sucção nos ensaios de cisalhamento direto

## 4.1.

### Caracterização física

Para a caracterização física dos solos, realizou-se ensaios de limites de consistência, peso específico dos grãos ( $G_s$ ) e análise granulométrica. As amostras foram preparadas de acordo com o procedimento de secagem prévia (NBR 6457/84).

#### 4.1.1.

##### Granulometria

Como os solos estudados são constituídos por frações grossas e finas, a análise granulométrica foi obtida pela combinação dos ensaios de peneiramento e de sedimentação (granulometria conjunta).

Os ensaios de granulometria seguiram as prescrições da norma NBR 7181/84, com algumas adaptações. A ABNT recomenda a realização de ensaios de sedimentação com material passante na peneira de 2 mm (#10), e os realizados foram feitos com o material passante na peneira de 0,42 mm (#40). No entanto, as alterações mais significativas são referentes aos fluidos utilizados como defloculante, o que gerou quatro situações. No caso do solo natural, além do ensaio de sedimentação convencional, que utiliza hexametáfosfato de sódio como defloculante, ensaios de sedimentação com água e licor cáustico em substituição ao hexametáfosfato de sódio foram efetuados. Já com o solo contaminado, o ensaio de sedimentação foi realizado com o defloculante que a ABNT recomenda (hexametáfosfato de sódio).

Em linhas gerais, os ensaios de sedimentação consistiram em colocar 50 gramas de solo destorroado (natural ou contaminado), seco ao ar, passante na peneira # 40 em 125 mL de defloculante (água, hexametáfosfato ou licor cáustico) e deixar em repouso por um período de 24 horas. Só então se procedia à dispersão mecânica e colocava-se a mistura em uma proveta de 1000 mL cujo volume era completado com água destilada.

#### 4.1.2.

##### Limites de Atterberg

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade seguiram as determinações das normas NBR 6459/84 e NBR 7180/84, respectivamente. Assim como nos ensaios de granulometria, algumas adaptações foram feitas, gerando 3 situações. Na primeira situação, utilizou-se o solo natural com água

destilada; na segunda, solo natural com licor cáustico e na terceira, solo contaminado com água destilada.

Todos os ensaios foram realizados com amostras destorroadas, secas ao ar e passantes na peneira # 40 acrescentando-se o fluido (água ou licor).

#### **4.1.3.**

#### **Densidade dos grãos ( $G_s$ )**

Na determinação do peso específico dos grãos, utilizou-se 25 gramas de solo passante na peneira # 40. A deaeração foi promovida pela aplicação de vácuo durante 15 minutos ou até a detecção de ausência total de bolhas de ar. O procedimento adotado está de acordo com a norma NBR 6508/1984.

Foram determinados os  $G_s$  apenas dos solos naturais.

#### **4.2.**

#### **Caracterização química**

A maioria dos ensaios referentes às análises químicas foram realizados no Centro Nacional de Pesquisas de Solos CNPS/EMBRAPA. As análises seguiram as metodologias apresentadas no Manual de Métodos de Análise de Solo (CNPS/EMBRAPA, 1997). Executou-se os seguintes ensaios: pH em água e KCl, condutividade elétrica, amorfos, complexo sortivo e ataque sulfúrico.

Com o intuito de caracterizar melhor os dois solos, ensaios de análise química total foram efetuados nos dois solos no estado natural. Estas análises foram realizadas no Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Nas amostras de solo, os elementos foram determinados por fluorescência de raios-X em amostras fundidas com tetraborato de lítio. Através destas análises foi possível determinar os teores de Sílica ( $SiO_2$ ), Alumina ( $Al_2O_3$ ), óxido de titânio ( $TiO_2$ ), ferro ( $Fe_2O_3$ ), cálcio (CaO), magnésio (MgO), sódio ( $Na_2O$ ), potássio ( $K_2O$ ), dentre outros elementos presentes nos solos.

#### **4.3.**

#### **Caracterização mineralógica**

A caracterização mineralógica das amostras foi obtida por meio dos ensaios de difração por raios-X (DRX), análise térmica diferencial e observação na lupa binocular.

#### **4.3.1. Difração por raios-X (DRX)**

Os ensaios de difração por raios-X foram executados no Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia (DCMM) da PUC-Rio, utilizando um difratômetro Siemens D5000, com irradiações realizadas no intervalo de 2 a 30°. A velocidade de varredura da amostra no difratômetro foi de 0,02° por segundo.

Na caracterização da fração areia fina, utilizou-se material passante na peneira # 40 e a análise foi feita pelo método do pó. Já para caracterizar as frações silte e argila fabricou-se lâminas delgadas pelo método do gotejamento com material passante nas peneiras # 200 e # 400.

#### **4.3.2. Análise térmica diferencial**

Para análise termodiferencial, foram utilizados materiais passantes na peneira # 40. Os ensaios foram executados no Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia (DCMM), com o auxílio de um equipamento do fabricante Perkin Elmer e do sistema de aquisição de dados Pyris. As amostras foram aquecidas até 800 °C, com aumento de 20 °C por minuto.

#### **4.4. Ensaio triaxiais**

Todos os ensaios triaxiais foram executados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

Descreve-se a seguir, os equipamentos utilizados neste tipo de ensaio, bem como as metodologias empregadas, dando-se maior ênfase a equipamentos e procedimentos desenvolvidos no presente trabalho.

##### **4.4.1. Equipamentos utilizados**

###### **4.4.1.1. Prensa triaxial**

As duas prensas utilizadas são da marca Wykeham-Ferrance, de velocidade de deslocamento controlada, com capacidade de 5 toneladas. O ajuste das velocidades de deslocamento do pistão é feito mediante uma seleção adequada de pares de catracas, com as respectivas marchas.

As células triaxiais empregadas são próprias para corpos de prova com diâmetro de 1,5” Possuem um copo de acrílico que suporta uma pressão confinante máxima de 1000 kPa. As bases de alumínio foram substituídas por bases de PVC desenvolvidas no laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio especialmente para ensaios triaxiais que envolvessem fluidos a base de soda cáustica (maiores detalhes ver trabalho de Costa Júnior, 2001).

#### **4.4.1.2.**

#### **Sistema de aplicação de pressão**

Na aplicação da pressão confinante e da contrapressão, utilizou-se um sistema de ar comprimido controlado por um painel de válvulas reguladoras de pressão (ver Figura 4.1). No caso da contrapressão o ar comprimido era aplicado no medidor de variação de volume (MVV) que transmitia pressão para o fluido (água ou licor). Os demais detalhes presentes na figura são discutidos a seguir.

#### **4.4.1.3.**

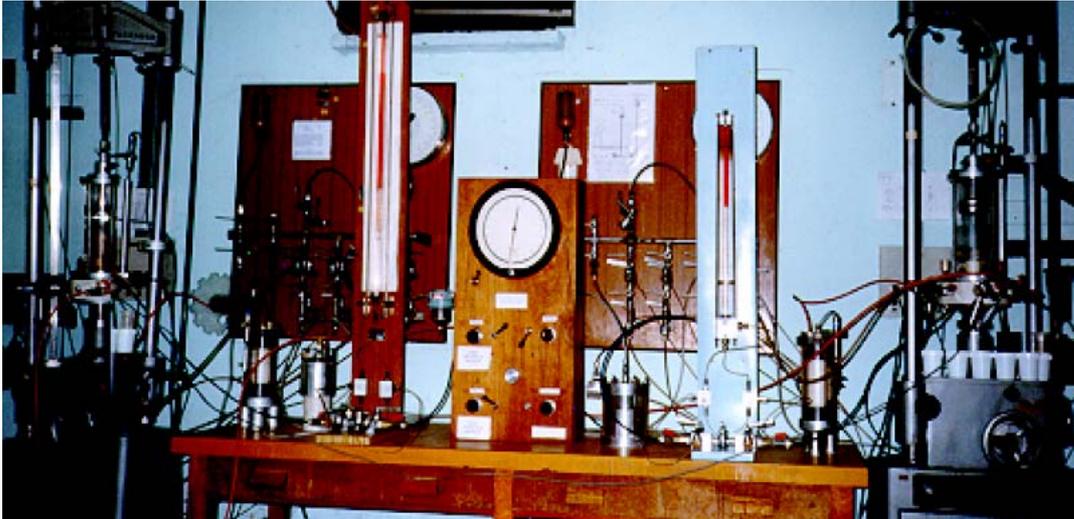
#### **Transdutores de força, de deslocamento e de pressão**

As células de carga utilizadas são do fabricante Wykeham-Ferrance, com capacidade máxima de 5 kN e exatidão de 0,01 N.

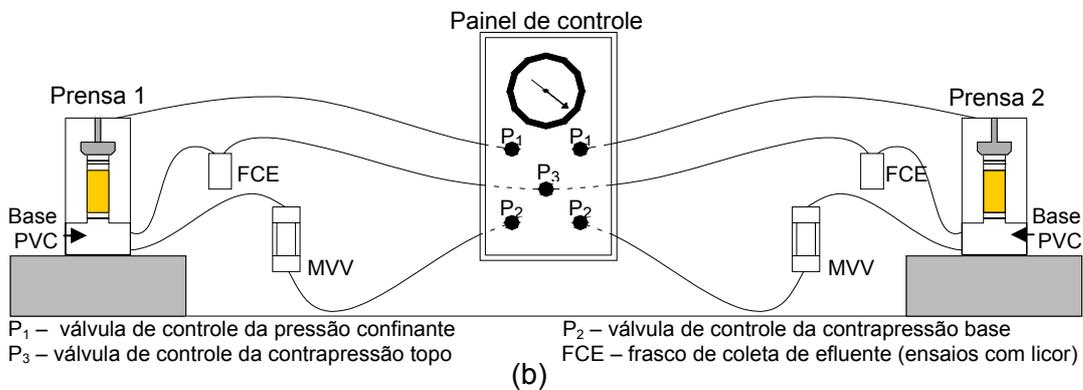
Para obtenção dos deslocamentos foram utilizados extensômetros elétricos da marca LSC Transducer, com cursor de 50 mm e resolução de 10  $\mu$ m.

Os transdutores empregados na medida das pressões na câmara e poropressões também são da Wykeham-Ferrance, com resolução de 1 kPa e capacidade máxima de 1000 kPa.

Todos os transdutores foram calibrados e testados antes da campanha de ensaios.



(a)



(b)

Figura 4.1 – Equipamentos utilizados nos ensaios triaxiais (a) foto ilustrativa (b) desenho esquemático

#### 4.4.1.4. Medidores de volume

As variações de volume são obtidas através de medidores de variação volumétrica (MVV), fabricados na PUC-Rio, com resolução de  $0,01\text{cm}^3$  (ver Figura 4.2).

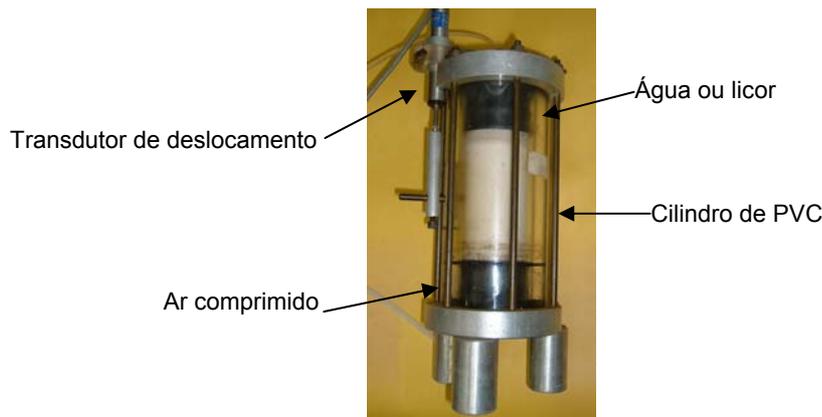


Figura 4.2 – Medidor de variação de volume utilizado nos ensaios triaxiais

#### **4.4.1.5. Sistema de aquisição de dados**

O sistema de aquisição de dados permitiu o monitoramento contínuo das grandezas necessárias para o acompanhamento dos ensaios. O sistema Orion SI353ID da Data Acquisition System, propiciou a gravação dos dados obtidos por intermédio dos transdutores elétricos.

#### **4.4.1.6. Acessórios: membrana de látex, papel filtro e pedras porosas**

Foram utilizadas membranas de látex importadas. Não houve perda de ensaio por furo na membrana. As membranas eram previamente testadas quanto a furos. Quando reutilizadas, eram lavadas, secas e impregnadas com talco para que não grudassem.

O papel filtro empregado foi o da marca Whatman nº 54, sendo previamente cortado antes de cada ensaio. Foi utilizado papel filtro na base e no topo dos corpos de prova.

As pedras porosas eram previamente limpas e fervidas antes de cada ensaio por no mínimo dez minutos, para expulsar ar dos vazios, sendo mantidas saturadas em água destilada até o momento de serem utilizadas. Sempre que necessário, as pedras porosas foram colocadas por 30 minutos em um ultrassom para retirar as sujeiras retidas nos poros.

#### **4.4.2. Procedimentos adotados nos ensaios**

Os procedimentos adotados seguiram recomendações dadas por Bishop e Henkel (1962) e Head (1986). As etapas comuns aos ensaios triaxiais com água e licor são descritas de forma conjunta, e os procedimentos peculiares a cada um estão devidamente indicados e descritos separadamente.

##### **4.4.2.1. Confecção dos corpos de prova**

Os corpos de prova foram obtidos a partir de amostras indeformadas. Para tanto, extraía-se um paralelepípedo dos blocos com o auxílio de uma faca amolada e no torno de moldagem definia-se o corpo de prova com dimensões aproximadas de 7,8 cm de altura e 3,8 cm de diâmetro. As medidas do corpo de prova eram verificadas com um paquímetro de exatidão de 0,01 mm. Massa, volume e teor de umidade também foram mensurados visando à determinação de índices físicos.

##### **4.4.2.2. Saturação das linhas**

*Ensaio realizados com água (sem contaminação do solo)*

- Todas as linhas da base da célula e a do “top cap” eram testadas em relação a entupimentos e em seguida saturadas com água destilada;
- Verificava-se se o medidor de variação de volume continha água suficiente para a fase de saturação do corpo de prova;
- Com auxílio de uma seringa, saturava-se os transdutores de poropressão e de pressão confinante.

*Ensaio realizados com licor cáustico (com contaminação do corpo de prova)*

- A água contida no medidor de variação de volume era substituída por licor cáustico. Colocava-se a maior quantidade possível de licor para que ele fosse utilizado na saturação das linhas e também na fase de percolação;
- Aplicava-se uma pequena pressão de ar na parte inferior do MVV e o licor então “empurrava” a água e o ar contidos nas linhas. Todas as

linhas da base e do “top cap” eram saturadas com licor cáustico contido no MVV. Sempre que necessário, reabastecia-se o MVV fechando-se as válvulas e reduzindo a pressão neste à zero.

- A saturação dos transdutores de poropressão era feita com maior frequência neste ensaio devido à possibilidade do contato com licor e da formação de bolhas de ar.

#### **4.4.2.3.**

##### **Montagem do ensaio**

- Separava-se todos os itens necessários à montagem. As membranas eram devidamente testadas;
- O primeiro passo da montagem era posicionar uma pedra porosa e um papel filtro circular (mesmo diâmetro do corpo de prova) saturados sobre o pedestal;
- Colocava-se o corpo de prova sobre o papel filtro. No topo do corpo de prova, acrescentava-se novamente a combinação papel filtro e pedra porosa saturados. No caso dos ensaios com licor, optou-se por utilizar a pedra porosa sempre entre dois papéis filtros por causa da possibilidade do licor conter sólidos capazes de entupir a pedra porosa;
- O restante da montagem seguiu a rotina convencional sugerida por Head (1986)

#### **4.4.2.4.**

##### **Saturação dos corpos de prova**

A técnica de saturação utilizada foi a de saturação por contrapressão. Esta técnica, além de saturar o corpo de prova, dissolve bolhas de ar que possam existir entre a amostra e a membrana e nas linhas de contrapressão. Para verificar se o grau de saturação era satisfatório, calculava-se o parâmetro B de Skempton, sendo:

$$B = \Delta u / \Delta \sigma_c$$

Onde:

$\Delta u$  – excesso de poropressão gerado

$\Delta \sigma_c$  – acréscimo de tensão confinante aplicado

Foram considerados aceitáveis valores de B maiores ou iguais a 0,98. A pressão confinante excedia a contrapressão em 10 kPa. A saturação dos corpos de prova foi alcançada para tensões confinantes superiores a 350 kPa.

No caso dos ensaios com licor, ao saturar os corpos de prova, obtinha-se nos poros destes, uma mistura de licor e água. A substituição total do fluido intersticial por licor era realizada através de percolação. O procedimento detalhado está descrito no item a seguir.

#### 4.4.2.5.

#### **Substituição do fluido intersticial água por licor cáustico**

Como já mencionado, nos ensaios com licor, após o processo de saturação, o que se tinha nos poros era uma mistura de licor e água. A princípio, não seria possível fazer esta substituição com o corpo de prova já saturado, pois seria necessário baixar a tensão confinante e a contrapressão para só então impor um gradiente hidráulico com a parte superior do corpo de prova aberta para atmosfera e assim induzir um fluxo ascendente. No entanto, este procedimento poderia provocar a diminuição do grau de saturação do corpo de prova. Para que isto não ocorresse seria necessário adaptar o método de aplicação de contrapressão no topo do corpo de prova. Por isso, criou-se um cilindro de acrílico que, acoplado ao sistema de aplicação de contrapressão no topo do corpo de prova, permitiu a imposição de um fluxo ascendente sem que fosse necessário abrir a parte superior do corpo de prova para a atmosfera. Este cilindro, denominado de frasco de coleta de efluente (FCE), suporta pressões de até 1000 kPa (Figura 4.1).

O sistema de substituição do fluido intersticial funciona da seguinte maneira:

- Após a saturação do corpo de prova, a pressão confinante e as contrapressões no topo e na base são ajustadas de maneira que se tenha uma tensão efetiva de cerca de 7 kPa, um gradiente hidráulico que não exceda a 10 e que provoque um fluxo ascendente. A tensão confinante aplicada não deve ser inferior a 350 kPa;
- Pela linha  $L_{AP}$  aplica-se pressão de ar no topo do corpo de prova que, sendo menor que a da base, permite a saída do efluente pela linha  $L_E$ . Este, por sua vez, se acumula no fundo do frasco de coleta de efluente (FCE) (ver Figura 4.3);
- Mede-se o volume que passa pela amostra através da quantidade de licor que sai do MVV;

- Deve-se percolar, no mínimo, um volume de licor correspondente a duas vezes o volume de vazios do corpo de prova, como sugerido por Costa Júnior (2001);
- A cada 20 % do volume de licor que se deve percolar, este é coletado pela linha  $L_s$  e seu pH tem de ser medido. Se o pH do efluente não estiver próximo ao do licor injetado, após percolado duas vezes o volume de vazios, continua-se o processo de percolação;
- No processo de coleta do efluente todas as válvulas são fechadas e a pressão de ar na linha  $L_{AP}$  cessada, para só então o efluente ser coletado. Em seguida, reaplica-se a pressão, abre-se as válvulas e o processo continua;
- O sistema de aplicação de contrapressão no topo do corpo de prova é comum às duas prensas utilizadas (ver Figura 4.1).

Após constatada a substituição do fluido intersticial inicial por licor, fecha-se a válvula que permite a atuação da contrapressão no topo do corpo de prova e aplica-se uma tensão efetiva no corpo de prova de 10 kPa para só em seguida iniciar o adensamento.



$L_E$  – linha por onde passa o efluente  
 $L_{AP}$  – linha de aplicação de pressão de ar no topo do CP  
 $L_S$  – linha de coleta do efluente

Figura 4.3 – Frasco de coleta de efluente (FCE) utilizado na substituição do fluido intersticial do corpo de prova por licor

#### 4.4.2.6. Adensamento

Com o corpo de prova saturado, dava-se início à fase de adensamento. Todos os adensamentos realizados foram isotrópicos. Adquiria-se dados de

variação de volume ao longo de 24 horas, não interrompendo o ensaio antes deste tempo mesmo quando constatado que não havia mais variação de volume.

Já com os dados do ensaio, traçava-se o gráfico variação volumétrica ( $\text{cm}^3$ ) x raiz do tempo (minutos). Conforme recomendações de Head (1986), prolongava-se o trecho retilíneo inicial até encontrar a horizontal correspondente ao trecho final (estabilização das variações volumétricas). O ponto de interseção fornecia a raiz de  $t_{100}$  em minutos (Figura 4.4). O valor de  $t_{100}$  era usado para definir a velocidade de cisalhamento.

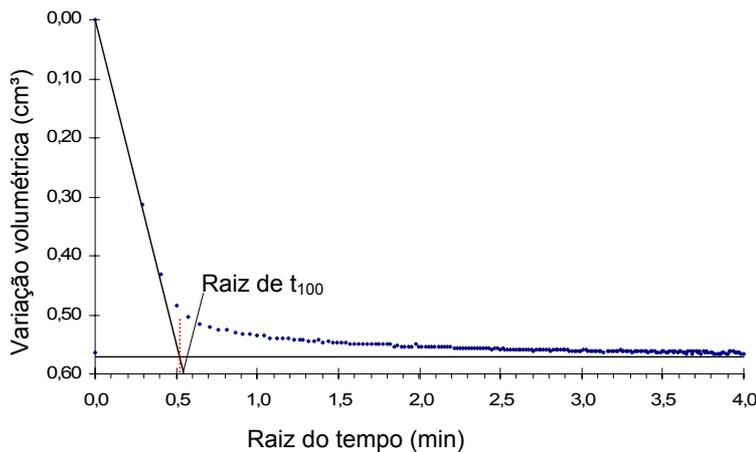


Figura 4.4 – Exemplo de gráfico utilizado no cálculo de  $t_{100}$  (ensaio triaxial CIU com  $\sigma'_c$  igual a 100kPa)

#### 4.4.2.7. Fase de cisalhamento

Logo após o término do adensamento, iniciava-se a fase de cisalhamento.

O cálculo da velocidade de cisalhamento foi feito conforme equação empírica proposta por Head (1986):

$$V_{\max} = \varepsilon_{er} \times L / (100 \times t_r)$$

Onde:

$V_{\max}$  = velocidade máxima de cisalhamento;

$L$  = altura do corpo de prova em mm;

$\varepsilon_{er}$  = deformação axial estimada na ruptura, em %;

$t_r$  = tempo mínimo de ruptura em minutos.

O valor de  $t_r$  depende das condições de drenagem e do tipo de ensaio triaxial (CIU ou CID). O valor de  $t_r$  para ensaios CIU sem drenagem radial é 0,51 vezes o valor de  $t_{100}$ . No caso de ensaios CID sem drenagem radial é de 8,5 vezes o valor do  $t_{100}$ . No entanto, tanto para os ensaios CID quanto para os

ensaios CIU, Head (1986) recomenda adotar um valor mínimo de  $t_r$  igual a 120 minutos.

Nos ensaios drenados, a compressão axial imposta deve ser suficientemente lenta de modo a permitir a total drenagem na água do corpo de prova. Já nos ensaios não drenados, a compressão axial imposta deve ser suficientemente lenta de forma a permitir a equalização dos excessos de poropressão gerados ao longo da altura do corpo de prova.

Todos os valores de  $t_r$  obtidos foram menores que 120 minutos, por isso foi adotado  $t_r = 120$  minutos. Admitiu-se também que a ruptura ocorreria para uma deformação axial de 1 %. Desta forma, a velocidade máxima calculada foi a mesma para todos os ensaios (0,008 mm/min), sendo a velocidade adotada igual a 0,006 mm/min.

Depois de definida a velocidade de deformação, colocava-se na prensa um par de engrenagens com a respectiva marcha, de forma a obter-se a velocidade desejada. A maioria dos ensaios de cisalhamento foi levada até uma deformação axial de 10 %.

#### **4.5. Cisalhamento direto**

O solo coluvionar estudado apresenta várias concreções, o que inviabilizou a moldagem de corpos de prova com as dimensões requeridas nos ensaios triaxiais. Por isso, optou-se por ensaios de cisalhamento direto para avaliar a influência do licor cáustico na resistência ao cisalhamento deste solo.

##### **4.5.1. Equipamentos**

###### **4.5.1.1. Prensas de cisalhamento direto**

Nos ensaios de cisalhamento direto foram utilizadas duas prensas fabricadas pela empresa Wykeram-Ferrance pertencentes ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

###### **4.5.1.2. Transdutores de deslocamento**

Mesmo tipo dos utilizados nos ensaios triaxiais (ver item 4.4.1.3).

#### **4.5.1.3.**

##### **Sistema de aquisição de dados**

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o mesmo dos ensaios triaxiais (ver item 4.4.1.5). Vale ressaltar que as leituras de carga foram realizadas automaticamente através de um anel de carga instrumentado, desenvolvido na PUC-Rio.

#### **4.5.1.4.**

##### **Acessórios: papel filtro e pedras porosas**

Ver item 4.4.1.6

#### **4.5.2.**

##### **Procedimentos adotados nos ensaios**

Os ensaios foram realizados seguindo procedimentos sugeridos por Head (1988). No entanto, algumas modificações fizeram-se necessárias devido à dificuldade de “contaminar” os corpos de prova nos ensaios com licor e da reação do licor com o equipamento. O procedimento desenvolvido e o motivo de sua escolha estão detalhados no item de saturação dos corpos de prova.

#### **4.5.2.1.**

##### **Confecção dos corpos de prova**

Os corpos de prova foram obtidos com o auxílio de anéis metálicos, bixelados, com dimensões aproximadas de 100,1 x 100,1 x 20 mm. Tais anéis eram untados com vaselina em pasta, com o objetivo de minimizar o atrito solo-molde. O passo seguinte era posicionar o anel sobre a superfície plana da amostra indeformada, na mesma direção que se encontrava no campo. Cuidadosamente cravava-se o anel alguns milímetros no solo. O solo em volta era então removido com uma faca amolada. O procedimento alternado de cravação do anel e desbaste com faca era repetido até o anel está preenchido com solo. O corpo de prova era então definido com a ajuda de uma espátula.

Muitos corpos de prova foram perdidos devido à presença de concreções. A Figura 4.8 mostra um corpo de prova descartado após romper durante a moldagem. Nele fica evidente a presença de manganês, principalmente, nas concreções.



Figura 4.5 – Corpo de prova descartado devido à “quebra” deste na interface concreção-matriz

As dimensões, o peso e o teor de umidade de cada corpo de prova foram medidos com o objetivo de determinar seus índices físicos.

#### **4.5.2.2. Saturação dos corpos de prova**

##### **4.5.2.2.1. Metodologia desenvolvida**

O procedimento desenvolvido consiste basicamente em saturar o corpo de prova, com água ou licor, por meio de sucção. A técnica foi baseada na utilizada por Moncada 2005 na saturação de corpos de prova para obtenção de curva característica.

No caso do ensaio realizado com licor, tentou-se secar o corpo de prova, ainda no anel metálico, ao ar, na estufa a 40° C e por sucção, para só então tentar saturá-lo. No entanto, todos estes procedimentos mostraram-se ineficientes devido à alta contração do solo (ver Figura 4.6). Por isso, optou-se por utilizar o solo em sua umidade natural.



Figura 4.6 – Corpo de prova do solo coluvionar após ser seco à vácuo

As etapas para saturação dos corpos de prova eram as seguintes:

- O primeiro passo era deaerar o fluido, água ou licor, que seria utilizada no processo de saturação, com a ajuda de um dessecador e de uma bomba de aplicação de vácuo;
- Em seguida colocava-se no dessecador, já com o fluido deaerado, uma pedra porosa de modo que o nível do fluido ficasse na metade de sua altura (ver Figura 4.7 (a)). Um papel filtro saturado era posicionado sobre a pedra porosa (ver Figura 4.7 (b));
- Sobre o papel filtro posicionava-se o corpo de prova (ver Figura 4.7 (c));
- Um papel filtro seco era posicionado acima do corpo de prova (ver Figura 4.7 (d)). O objetivo da utilização deste papel seco era monitorar a saturação do corpo de prova. Com a aplicação da sucção, o fluido, contido no dessecador, percola o solo por capilaridade, chegando em seguida ao papel filtro.
- Adicionava-se ao sistema um indicador de pH (apenas nos ensaios com licor) para que, juntamente com a observação da saturação do papel filtro superior, fosse constatada a saturação do corpo de prova (ver Figura 4.7 (e));
- Por fim, aplicava-se sucção por cerca de 10 minutos (ver Figura 4.7 (f)). Caso o papel filtro superior não estivesse totalmente saturado seguia-se aplicando sucção até que isto ocorresse.

No caso dos ensaios com licor não se consegue, com esta metodologia, substituir o fluido intersticial completamente, o que se obtém é uma mistura de água e licor.

É importante ressaltar que não foram realizados ensaios complementares para comprovar a saturação dos corpos de prova, e por isso não se sabe ao certo o grau de saturação de cada um após este processo. O que se tentou fazer foi submeter todos os corpos de prova a mesma situação de modo a possibilitar comparações dos resultados posteriormente.

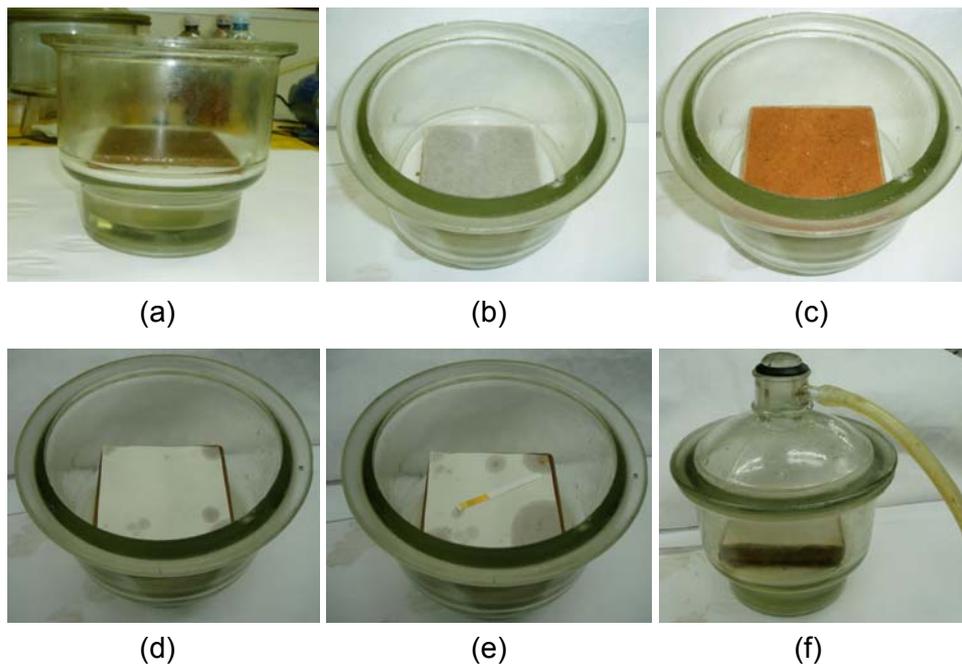


Figura 4.7 – Procedimento de saturação dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto (a) posicionamento da pedra porosa (b) adição do papel filtro saturado (c) posicionamento do corpo de prova (d) papel filtro seco colocado sobre o corpo de prova (e) medidor de pH para auxiliar na verificação da saturação (f) corpo de prova sendo submetido a sucção

#### 4.5.2.2.2.

#### Escolha do método de contaminação dos corpos de prova

A princípio, pensava-se em realizar ensaios de cisalhamento direto com os corpos de prova submersos em água e licor, mesmo acreditando que apenas a submersão não fosse representar de maneira satisfatória a influência do contaminante no comportamento mecânico do solo. No entanto, ao realizar o primeiro ensaio com licor ( $\sigma_v = 50$  kPa), em que se deixou o corpo de prova submerso por 24 horas no equipamento de cisalhamento direto antes de se iniciar o adensamento, o contaminante atacou a caixa de cisalhamento e a caixa bipartida, ambas de alumínio, de modo que estas duas partes “grudaram”. Diante destes dois fatores, suposta ineficiência da submersão e ataque violento do licor ao equipamento, optou-se por tentar desenvolver um método de contaminação do solo antes da montagem do ensaio. Deste modo, garantiria-se que o corpo de prova estaria realmente contaminado com licor e diminuiria-se o tempo de contato entre o licor e o equipamento.

Após definida a metodologia descrita no item anterior, resolveu-se testá-la através da comparação dos resultados de ensaios de cisalhamento direto com tensão vertical de 50 kPa nas seguintes situações:

- *Corpo de prova submerso em água:* consistiu basicamente em iniciar o adensamento assim que terminada a montagem do ensaio, com a inundação da caixa de cisalhamento logo após a aplicação da carga vertical (procedimento convencional);
- *Corpo de prova submerso em licor:* diferiu do ensaio realizado com água apenas pelo fato do corpo de prova ficar 24 horas submerso em licor antes do início do adensamento;
- *Corpo de prova saturado com água:* consistiu em tentar saturar o corpo de prova com água antes da montagem do ensaio de cisalhamento direto (procedimento desenvolvido);
- *Corpo de prova saturado com licor:* mesmas considerações que as do corpo de prova saturado com água, sendo a água substituída por licor.

A Figura 4.8 mostra as curvas tensão cisalhante x deslocamento destes ensaios. Os ensaios realizados de maneira convencional (apenas submersos) apresentaram resistência superior a dos ensaios saturados. Isto já era de se esperar, tendo em vista que o grau de saturação nos ensaios submersos é inferior a 100 %. O fato do ensaio realizado com o corpo de prova submerso em água apresentar resistência superior ao submerso em licor não pode ser atribuído apenas à atuação do licor, mas também ao fato do corpo de prova no ensaio realizado com água não ter sido deixado submerso por 24 horas antes do adensamento, como no ensaio com contaminante. Isto pode ter implicado em um grau de saturação maior no ensaio com licor e por isso em uma resistência mais baixa.

Como os resultados apresentados na Figura 4.8 mostraram-se coerentes, o procedimento de “saturação” desenvolvido foi adotado e aplicado tanto nos ensaios com licor como nos ensaios com água.

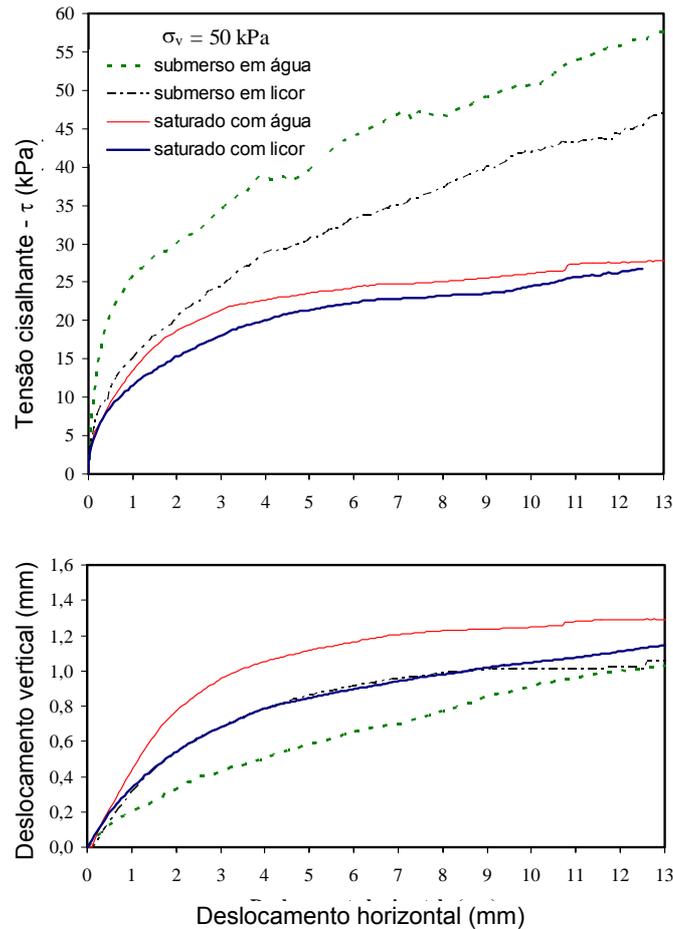


Figura 4.8 – Curvas representando o comportamento de corpos de prova saturados com água e licor, e submersos em água e licor

#### 4.5.2.3. Adensamento

A fase de adensamento era iniciada após a instalação do corpo de prova corpo de prova, já saturado, na caixa bipartida. Aplicava-se a tensão normal e posteriormente inundava-se o interior da caixa, com água ou licor. Todos os corpos de prova foram adensados por 24 horas.

Com os dados obtidos nesta fase, traçava-se uma curva deslocamento vertical x raiz do tempo e calculava-se  $t_{100}$ , como mostrado no item 4.4.2.6. De acordo com Bishop e Henkel (1962), o tempo requerido para a ruptura ( $t_r$ ) é relacionado a  $t_{100}$  pela equação empírica:

$$t_r = 12,7 \cdot t_{100}$$

Todos os valores de  $t_{100}$  encontrados foram menores que um minuto, com exceção do ensaio realizado com tensão normal igual a 25 kPa e saturado com licor ( $t_{100} = 16$  min).

#### **4.5.2.4. Cisalhamento**

Logo após o término do adensamento, iniciava-se a fase de cisalhamento.

O cálculo da velocidade de cisalhamento foi feito admitindo-se que a ruptura ocorreria para um deslocamento de 7 mm e adotando um  $t_f$  igual a 150 minutos, já que a maioria dos  $t_f$ 's encontrados não ultrapassaram 12 minutos. Desta maneira a velocidade calculada foi 0,046 mm/min e a adotada 0,048 mm/min.

Depois de definida a velocidade de deslocamento, colocava-se na prensa um par de engrenagens com a respectiva marcha de forma a obter-se a velocidade adotada. A maioria dos ensaios de cisalhamento foi levada até um deslocamento horizontal de 10 mm.

#### **4.6. Caracterização do licor**

Para caracterizar o licor, foram realizados ensaios de teor alcalino, pH e condutividade elétrica. Todos os ensaios foram executados no laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

O pH foi medido com o auxílio de um medidor portátil da Tecnopon. Concomitantemente, foi medida a condutividade elétrica com portátil também da Tecnopon.

O teor alcalino do licor cáustico foi avaliado através de titulação com uma solução de ácido sulfúrico 0,4 N.