# 3 Programa Experimental

O programa de ensaios estabelecidos nesta dissertação tem como principal objetivo avaliar o efeito da adição de poliestireno expandido (EPS) nas propriedades mecânicas de um solo coluvionar argiloso, de um solo arenoso e da bentonita.

As etapas do programa experimental proposto são detalhadamente descritas neste capítulo, bem como a descrição dos materiais utilizados na pesquisa, os métodos utilizados na preparação das amostras, detalhes de execução dos ensaios e equipamentos utilizados nos ensaios de laboratório.

Os ensaios do programa experimental desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

# 3.1. Materiais utilizados na pesquisa

### 3.1.1. Solo Argiloso

A argila utilizada neste trabalho é um solo maduro, coluvionar, argilo-arenoso, não saturado (Soares, 2005 apud Ramirez, 2012). Este solo foi coletado no Campo Experimental II, localizado no interior do campus da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, conforme o esquema mostrado na Figura 3.1. O material foi retirado de uma profundidade de 2 metros, a partir da superfície da encosta.



Figura 3.1 - Localização do Campo Experimental II PUC-Rio (Soares, 2005).

Este solo coluvionar possui características de tonalidade vermelha amarelada, textura micro-granular e com aspecto homogêneo, sendo constituído basicamente por quartzo, granada alterada, argilominerais (essencialmente caulinita) e óxidos de ferro e alumínio, como produto do intemperismo dos minerais primários da biotita gnaisse (Soares, 2005 apud Ramirez, 2012). O solo coluvionar utilizado na pesquisa é apresentado na Figura 3.2.

As características geotécnicas físicas deste material são apresentadas e analisadas no item 4.1.

O material foi retirado manualmente e depositado em baldes cilíndricos de plástico. Após a coleta, o solo foi levado para o laboratório e colocado na estufa a 60°C. Depois de atingir uma umidade constante, foi colocado em sacolas de plástico lacradas e guardado na câmara úmida.

Este tipo de solo já foi utilizado anteriormente em outras pesquisas desenvolvidas na PUC-Rio (Sertã, 1986; Marinho, 1986; Lins, 1991; Daylac, 1994; Beneveli, 2002; Soares, 2005). Sertã (1986) fez um estudo dos aspectos geológicos e geotécnicos do solo coluvionar do Campo Experimental II, deixando um amplo conhecimento das suas características.



Figura 3.2 - Solo coluvionar utilizado.

Segundo o perfil morfológico feito por Daylac (1994) apresentado na Figura 3.3, o solo utilizado está situado na camada superior do perfil, conformada por colúvio. No lugar da coleta, se observou presença de alguns pedregulhos de quartzo. No processo de preparação do solo para os ensaios (destorroamento), se retiraram as raízes presentes no material.



Figura 3.3 - Descrição morfológica do perfil do Campo Experimental II da PUC-Rio (Daylac, 1994)

Sertã (1986) fez uma análise mineralógica do solo presente no Campo Experimental II. A Tabela 3.1, elaborada por Daylac (1994), resume os resultados obtidos por Sertã para amostras retiradas entre 3,00 m e 3,50 m de profundidade. A presença imperante de certos minerais como a caulinita, a gibsita e a goetita, e o perfil morfológico apresentado anteriormente sugerem que o solo tem um alto grau de intemperismo.

Fração do solo	Mineral	Quantidade / observações	
Pedregulho	Quartzo	grãos arestados de coloração transparente a leitosos	
	Granada alterada	alguns fragmentos	
Areia	Quartzo	grãos arestados	
	Granda muito alterada	correspondem a aproximadamente	
	Agregados Ferruginosos	5% da amostra total	
	Magnetita	pequenos traços	
Silte	Quartzo	presença	
	Caulinita	presença	
	Goetita	presença	
Argila	Caulinita	presença marcante	
	Goetita	alguns traços	

Tabela 3.1 - Análise mineralógica (Sertã, 1986).

Este solo coluvionar foi utilizado também por Szeliga (2011), Ramírez (2012), Quispe (2013), entre outros, realizando-se ensaios de caracterização física no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Os resultados são apresentados no item 4.1.1.

# 3.1.2. Solo Arenoso

A areia utilizada neste estudo é proveniente de uma praia localizada na Barra da Tijuca – RJ (Figura 3.4). É uma areia média, limpa e mal-graduada (Figura 3.5). Os resultados da curva granulométrica e índices físicos são apresentados no item 4.1.2.



Figura 3.4 - Localização do ponto de coleta de areia na Barra da Tijuca - RJ.



Figura 3.5 - Areia utilizada na pesquisa.

# 3.1.3. Bentonita

A bentonita (Figura 3.6) utilizada nesta pesquisa foi adquirida comercialmente no Rio de Janeiro. Segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995), essa bentonita pode ser classificada como uma argila. Os resultados da curva granulométrica e índices físicos são apresentados no item 4.1.3.



Figura 3.6 - Bentonita utilizada na pesquisa.

# 3.1.4. Poliestireno Expandido (EPS)

As pérolas de EPS (Figura 3.7) utilizadas nesta pesquisa foram adquiridas comercialmente no Rio de Janeiro. Na prática, essas pérolas podem ser provenientes do trituramento de placas de isopor descartadas transformando-as em partículas menores. O diâmetro médio das pérolas utilizadas nos ensaios é de, aproximadamente, 1 mm.



Figura 3.7 - Pérola de EPS utilizada na pesquisa.

### 3.1.5. Água

A água utilizada na preparação dos corpos de prova para ensaios de compactação (solo coluvionar), ensaio triaxial (solo coluvionar e arenoso) e ensaio de cisalhamento direto (bentonita) foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro. Nos ensaios de caracterização física foi utilizada água destilada.

### 3.1.6. Mistura Solo-EPS

Para cada solo foram preparadas misturas com diferentes teores de EPS, com o objetivo de determinar o teor ótimo para a inserção deste material como reforço. As misturas utilizadas com o solo argiloso foram 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,0% de pérolas de EPS, calculados em relação ao peso seco do solo. No caso do solo arenoso e da bentonita foram preparadas duas misturas com 0,50% e 0,75% de pérolas de EPS, em relação ao peso seco do solo.

Esses teores foram determinados com o intuito de analisar a evolução ou retrocesso da melhoria dos parâmetros de resistência de cada tipo de solo e misturas, a fim de se estabelecer uma melhoria máxima com o maior volume de resíduo, já que, um dos objetivos do uso deste material como reforço, é dar uma destinação ambientalmente correta para a maior quantidade possível.

A quantidade de pérolas de EPS a ser usada em cada mistura foi calculada em relação ao peso total do solo seco. O volume de água adicionado no solo argiloso foi determinado em função da umidade ótima obtida nos ensaios de Compactação Proctor Normal. No caso do solo arenoso e bentonita, as misturas foram preparadas com umidade de, respectivamente, 10% e 170%. Essas porcentagens foram determinadas a partir de ensaios de cisalhamento direto, onde esses valores se apresentaram similares aos valores encontrados por Casagrande (2005).

Na Tabela 3.2 são apresentadas as siglas utilizadas para identificar cada tipo de solo e as misturas.

Material / Mistura	Solo (%)	Pérolas de EPS (%)	Símbolo
Solo Argiloso	100	0	S100
Mistura 1	99,75	0,25	S99,75/EPS0,25
Mistura 2	99,50	0,50	S99,50/EPS0,50
Mistura 3	99,25	0,75	S99,25/EPS0,75
Mistura 4	99,00	1	S99/EPS1
Solo Arenoso	100	0	A100
Mistura 5	99,50	0,50	A99,50/EPS0,50
Mistura 6	99,25	0,75	A99,25/EPS0,75
Bentonita	100	0	B100
Mistura 7	99,50	0,50	B99,50/EPS0,50
Mistura 8	99,25	0,75	B99,25/EPS0,75

Tabela 3.2 - Símbolos utilizados para os solos e misturas.

## 3.2. Métodos e Procedimentos de Ensaio

Neste item serão apresentados as metodologias e procedimentos utilizados para as análises físicas e mecânicas do solo argiloso, arenoso e bentonita.

O objetivo deste programa experimental foi a caracterização de cada solo no intuito de conhecer seu comportamento e posteriormente realizar os ensaios mecânicos (ensaios de compactação proctor normal e ensaios triaxiais drenado, no caso do solo argiloso, ensaios triaxiais drenados, no caso do solo arenoso e ensaios de cisalhamento direto, no caso da bentonita) a fim de conhecer seus parâmetros de resistência e ter uma idéia de como o poliestireno expandido pode atuar como estabilizante no solo.

#### Ensaios de Caracterização Física

Com a finalidade de determinar as propriedades índices das amostras de solo argiloso proveniente do Campo Experimental II do campus da PUC-Rio, da bentonita e do solo arenoso foram executados ensaios de caracterização física no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Os três materiais foram preparados segundo o preconizado nas normas técnicas brasileiras (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT). No caso do solo argiloso e bentonita, os ensaios realizados seguiram os métodos indicados pelas seguintes normas:

- NBR 6457/1986 Amostras de Solos Preparação para ensaios de compactação e caracterização;
- NBR 7181/1984 Solo Análise Granulométrica;
- NBR 6508/1984 Solo Determinação da densidade real dos grãos;
- NBR 6459/1984 Solo Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180/1984 Solo Determinação do Limite de Plasticidade.

E no caso do solo arenoso, os ensaios realizados seguiram os procedimentos indicados pelas seguintes normas:

- NBR 6457/1986 Amostras de Solos Preparação para ensaios de compactação e caracterização;
- NBR 7181/1984 Solo Análise Granulométrica;
- NBR 6508/1984 Solo Determinação da densidade real dos grãos;
- NBR 12004/1990 Solo Determinação do índice de vazios máximos de solos não coesivos;
- NBR 12051/1991 Solo Determinação do índice de vazios mínimos de solos não coesivos.

No caso do EPS não foi feita a caracterização física, pois o EPS é considerado inerte. Assim, foi feita a caracterização física apenas dos solos.

#### Densidade Real dos Grãos

A densidade real dos grãos do solo argiloso e arenoso foi determinada utilizando o material que passou na peneira #40 (0,425 mm), segundo a norma NBR 6508/1984 da ABNT.

Do material passante da peneira #40 seco em estufa a 105 °C foi utilizado aproximadamente 100 gramas de solo argiloso e 120 gramas de solo arenoso. Posteriormente foram colocados 25 gramas, no caso do solo argiloso, e 30 gramas, no caso do solo arenoso, em quatro picnômetros de 250 ml e se cobriu o material dentro dos picnômetros com água destilada. Em seguida procedeu-se à extração do ar contido entre as partículas, utilizando uma bomba de vácuo. Esse procedimento é realizado durante 15 minutos, aproximadamente, que é o tempo que demora extrair todo o ar em forma de bolhas. No passo seguinte os quatro picnômetros foram cheios com água destilada e pesados.

Para determinar a densidade real dos grãos da bentonita a partir do método usado para os dois solos descritos anteriormente foi difícil, uma vez que este material apresenta granulometria muito fina. Sendo assim, a água adicionada aos picnômetros para a realização do ensaio não conseguia penetrar e molhar todo o solo contido nos mesmos (25g). Em função disso, formava-se uma camada de solo seco aderida às paredes no fundo dos picnômetros, além da formação de grumos do material. Além de ser um material de granulometria fina, a bentonita sódica é altamente expansiva, causando problemas como formação de camada de solo seco no fundo dos picnômetros, formação de grumos, inchamento excessivo e perda de material durante a aplicação do vácuo, o que tornou impraticável o ensaio com uma massa de solo de 25g. Várias tentativas foram feitas e adotou-se para este trabalho o seguinte procedimento complementar:

- Utilização de uma massa de solo de 10g;
- Adição e homogeneização do solo aos poucos dentro do picnômetro já tarado com uma determinada quantidade de água. Dessa maneira foi possível molhar todo o solo e evitou-se a formação da camada de solo seco aderida ao fundo do picnômetro;
- Dispersão do material já dentro dos picnômetros, durante 30 minutos, através de um aparelho de ultra-som para evitar a perda de material e conseguir uma dispersão mais efetiva (Figura 3.8 a);

Retirada do ar através da aplicação do vácuo com auxilio de uma bomba (Figura 3.8 b).



Figura 3.8 - (a) Procedimento de dispersão em aparelho de ultra-som e (b) Bomba a vácuo.

#### Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg, limite de liquidez e limite de plasticidade do solo argiloso e da bentonita foram determinados utilizando-se o material passante na peneira #40 (0,425 mm), segundo as normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984 da ABNT.

### Análise Granulométrica

Para a determinação da curva granulométrica do solo argiloso, peneirou-se 1000 gramas do material na peneira #40 (0,425 mm), seguindo a norma NBR 7181/1984 da ABNT. O material retido na peneira foi lavado e posteriormente secado na estufa a 105 °C. Depois de 24 horas se realizou o peneiramento grosso com este material.

Do material passante na peneira #40, utilizou-se 50,39 gramas para a sedimentação, sendo este misturado com 125 ml de uma solução de hexametafosfato de sódio e deixado em repouso durante 24 horas.

Depois de realizada a sedimentação, todo o material foi lavado na peneira #200 e o retido levado à estufa, para quando seco proceder com o peneiramento fino.

Para a determinação da curva granulométrica do solo arenoso, peneirou-se 1000 gramas do material na peneira #40 (0,425 mm), seguindo a norma NBR 7181/1984 da ABNT.

O material retido na peneira foi lavado e posteriormente secado na estufa a 105 °C. Depois de 24 horas se realizou o peneiramento grosso com este material. Para a determinação da curva granulométrica da bentonita, onde só tem a fase de sedimentação, inicialmente o ensaio foi feito segundo os procedimentos da NBR 7181/1984. Porém, tal material apresentou alguns problemas, já mencionados anteriormente na determinação da densidade real dos grãos. Assim, uma grande quantidade de material ficava aderido às paredes do recipiente antes de ser iniciada a sedimentação, causando perda de material. O hexametafosfato de sódio, utilizado como defloculante, produziu um efeito contrário à sua ação dispersante natural. O material ao invés de deflocular, floculou. Dessa maneira, foi adotado outro procedimento utilizando-se 50 gramas de bentonita misturada com 125 ml de hexametafosfato de sódio e mais 200 ml de água. Em seguida, essa mistura foi deixada em repouso durante 24 horas. Depois de realizada a sedimentação, todo o material foi lavado na peneira #200 e nenhum material ficou retido na peneira.

### Índice de vazios mínimos e máximos

Inicialmente, mediu-se a altura e diâmetro interno do molde, a fim de calcular o volume interno do cilindro usado no ensaio, e pesou-se o cilindro vazio.

A determinação do índice de vazio máximo, segundo a NBR12004/1990, é feita inicialmente homogeneizando uma amostra seca de areia. Com o auxílio de um funil, colocou-se o solo no molde, tão fofo quanto possível, vertendo-o através do bico em fluxo constante e mantendo o funil em posição vertical. Ajustou-se continuamente a altura do bico, de modo que a queda livre do material seja da ordem de 1 cm ou apenas o suficiente para assegurar um fluxo contínuo da partículas do solo, sem que o bico entre em contato com o material já depositado. Moveu-se o funil segundo uma trajetória espiralada, da borda para o centro do molde, de forma a resultar camadas com espessuras uniformes. Encheu-se o molde até 1 a 2 cm acima do topo dele. O excesso de solo acima do cilindro foi retirada com auxílio de uma régua de aço biselada e pesou-se o conjunto.

A determinação do índice de vazio mínimo, de acordo com a NBR 12051/1991, é realizada inicialmente também homogeneizando uma amostra seca de areia. Com auxílio do funil, encheu-se o molde com a amostra de solo até 1 a 2 cm acima do topo do molde e retirou-se o excesso. Em seguida, colocou-se o disco-base da sobrecarga sobre a superfície da amostra de solo e girou-o levemente algumas vezes, de forma que ele tenha ficado firme e uniformemente em contato com a superfície do material. Fixou-

se o molde à mesa vibratória e o tubo guia ao molde, tendo-se garantido previamente que as paredes internas destes estavam alinhadas. Depois, assentou-se a sobrecarga correspondente sobre o disco-base e o solo ficou sobre vibração por um minuto. Após a vibração, o cilindro foi pesado.

Tanto para determinar o índice de vazio máximo, quanto para determinar o índice de vazio mínimo, foram feitos três ensaios em cada, e retirado a média.

### 3.2.1 Ensaios de Caracterização Mecânica

#### Ensaios de Compactação Proctor Standard

Os ensaios de compactação foram realizados para o solo argiloso e misturas solo-EPS, com o objetivo de determinar a umidade ótima de compactação ( $w_{\delta tm}$ ) e o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmáx}$ ) do solo e das misturas. Os ensaios foram realizados segundo as diretrizes da norma NBR 7182 da ABNT, utilizando-se a energia de compactação Proctor Normal e com reuso de material.

Após secagem do solo em estufa a uma temperatura de 60°C, iniciou-se o processo de destorroamento deste, passando-o posteriormente pela peneira #4, adotando-se o procedimento descrito pela norma NBR 6457 (ABNT, 1986) - preparação com secagem prévia até a umidade higroscópica. Em seguida, adicionou-se uma determinada quantidade de água ao material, a fim de que este ficasse com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima. Este valor pode ser estimado inicialmente através do limite de plasticidade, cujo valor pode se aproximar ao da umidade ótima. Após mistura do solo argiloso (puro e com as diversas porcentagens de EPS) com o volume de água calculado, homogeneizou-se bem o material.

Com as misturas preparadas, colocou-se o material dentro do molde cilíndrico pequeno (cilindro Proctor), de dimensões 10 cm x 12,7 cm (diâmetro x altura). Aplicouse 26 golpes com um soquete pequeno, de peso igual a 2,5 kg, o qual se deixa cair na camada de solo a uma altura de 30,5 cm aproximadamente. As porções de solo compactadas devem ocupar cerca de 1/3 da altura total do molde (compactação em três camadas). A fim de se obter uma boa aderência entre as camadas compactadas, escarificou-se bem cada uma delas antes de se compactar a camada sobrejacente. Em geral, depois de completar as três camadas, atinge-se uma altura maior do que a do molde, o que ocorre devido à utilização de um anel complementar, que garante a altura total necessária. Este excesso é removido no final do ensaio, acertando-se o volume de solo em relação à altura do molde.

Concluído o processo de compactação, o cilindro é pesado juntamente com o solo. Com o peso total do corpo de prova e o volume do cilindro, é possível calcular seu peso específico úmido. Através da retirada de três amostras do interior do corpo de prova (em sua parte média), determina-se sua umidade média após secagem em estufa. Calcula-se, então, o peso específico seco do material.

Terminado todo o procedimento, um novo corpo de prova é preparado com uma quantidade maior de água, aumentando-se a umidade da mistura em aproximadamente 2%. Assim, realiza-se uma nova compactação e obtém-se dessa forma um novo par de valores de umidade (w) e peso específico seco ( $\gamma_d$ ).

Com todos os pontos obtidos, plota-se um gráfico de peso específico seco versus umidade, tendo-se então a curva de compactação. Os valores de  $w_{ótm}$  e  $\gamma_{dmáx}$  obtidos correspondem ao ponto máximo das curvas e foram utilizados para moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios triaxiais CID. O procedimento completo foi repetido cinco vezes para cada mistura, a fim de se obter cinco pares de valores, sendo ao menos dois no ramo seco e dois no ramo úmido da curva de compactação.

#### Ensaios Triaxiais CID

Os ensaios triaxiais realizados neste trabalho são do tipo Consolidado Isotropicamente Drenado (CID). Os ensaios foram executados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Descreve-se a seguir os equipamentos utilizados nestes ensaios, bem como as metodologias empregadas na preparação dos corpos de prova, processo de saturação e cisalhamento.

#### Equipamento utilizado

A prensa utilizada é da marca Wykeham-Ferrance, de velocidade de deslocamento controlada, com capacidade de 10 toneladas (Figura 3.9). O ajuste das velocidades de deslocamento do pistão é determinado mediante a seleção adequada de pares de engrenagens e a respectiva marcha (Ramírez, 2012).

A câmara triaxial empregada é própria para corpos de prova com diâmetro de 1,5". Essa câmara é feita de um material acrílico que suporta uma pressão confinante máxima de 1000 kPa (Ramírez, 2012).

A célula de carga utilizada é do fabricante ELE International Ltd., com capacidade máxima de 5000 kN e exatidão de 0,1 kN. Para a obtenção dos deslocamentos foram utilizados LVDT's da marca Wykwham Farrance, com cursos de 25 mm e resolução de precisão de 0,01 mm. O transdutor usado na medida das pressões na câmara, no medidor de variação de volume e das poropressões são da marca Schaevitz, com variações de  $\pm$  2,0 kPa e capacidade máxima de 1700 kPa (Ramírez, 2012).

As variações de volume são obtidas através de medidores de variação volumétrica (MVV), fabricados na PUC-Rio, segundo o modelo do Imperial College (Figura 3.10).

A gravação dos dados, obtidos por intermédio dos transdutores, foi feita utilizando o sistema de aquisição de dados composto pelo hardware QuantumX de oito canais da empresa alemã HBM e pelo software CatmanEasy (Ramirez, 2012) (Figura 3.11).

Com esses equipamentos mencionados foi possível realizar e monitorar, em tempo real, todas as etapas do ensaio.



Figura 3.9 - Prensa triaxial da marca Wykeham-Ferrance



Figura 3.10 - Medidor de Variação de Volume tipo Imperial College.



Figura 3.11 - (a) Software CatmanEasy; (b) Sistema de aquisição de dados (Ramirez, 2012).

49

### Preparação dos corpos de prova do solo argiloso

Para a confecção dos corpos de prova do solo argiloso puro e das misturas solo-EPS, inicialmente compactou-se um corpo cilíndrico na energia Proctor Normal, utilizando a umidade ótima e peso específico seco máximo obtido para o solo e para cada mistura (Figura 3.12).



Figura 3.12 - Corpo cilíndrico compactado.

Obtido o material compactado, o corpo de prova foi moldado utilizando um aparelho de fabricação própria do laboratório (Figura 3.13). De cada corpo compactado, retiram-se três pequenos corpos-de-prova, sendo assim obtém-se as mesmas condições para cada ensaio. As dimensões dos corpos de prova foram 7,82 cm de altura e 3,80 cm de diâmetro.



Figura 3.13 - Corpo de prova após moldagem.

Conforme mencionado no item 3.1.4, o diâmetro das partículas ensaiadas apresentaram diâmetro em média de 1 mm. Ensaios foram realizados com pérolas de diâmetro de 3 mm porém não deu certo, devido a desintegração do corpo de prova (Figura 3.14).



Figura 3.14 - Corpo de prova com pérolas de 3mm de diâmetro.

# • Preparação dos corpos de prova do solo arenoso

A confecção dos corpos de prova do solo arenoso puro e das misturas solo-EPS foi feita por compactação diretamente num molde cilíndrico tripartido. Esta compactação foi realizada manualmente em oito camadas. Para a areia pura e misturas, a umidade e peso específico seco adotados foram de 10% e 1,63 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Estes valores correspondem a uma densidade relativa de 50% e índice de vazios de 0,63. A Figura 3.15 ilustra as etapas da montagem dos corpos de prova.

Montagem do corpo de prova arenoso						
<ol> <li>A membrana é colocada na base onde os o-rings são inseridos para segura- la.</li> </ol>	2 - O molde tripartido é colocado sendo as três partes unidas por uma abraçadeira metálica.	3 - As juntas são vedadas por uma fita cinza. É vedado também dois dos três furos de acesso ao interior do molde. Os o-rings são colocados na parte superior do molde tripartido e a membrana é ajustada por cima.	4 - Uma mangueira é instalada para conectar o tripartido a bomba a fim de exercer sucção à membrana e colar esta contra as paredes do tripartido.			
5 - Um papel filtro é colocado sobre a pedra porosa da base e o material vai sendo adicionado aos poucos, compactando ao todo oito camadas.	6 - Coloca-se o papel filtro, a pedra porosa e o <i>cap</i> na parte superior do corpo de prova. Em seguida, ajusta-se a membrana ao redor do cap e esta é fixada através dos o-rings.	7 - Todos os elementos que são utilizados para moldar o corpo de prova é desmontado e a membrana é acomodada cobrindo os o-rings da parte inferior.	8 - A câmara triaxial é colocada e ocorre o enchimento da câmara com água destilada .			

Figura 3.15 - Montagem do corpo de prova arenoso.

### Procedimento de saturação dos corpos de prova

As técnicas de saturação utilizadas para os corpos de prova de argila, de areia e para suas respectivas misturas foram de saturação por percolação de água através da amostra e por contrapressão. No caso da percolação, a diferença da contrapressão entre o topo e a base do corpo de prova foi de 5 kPa, sendo que a água fluía da base para o topo do corpo de prova. Na saturação por contrapressão, a pressão confinante aplicada ao corpo de prova excedia a contrapressão em 10 kPa, onde o fluxo de água era permitido pelo topo e base.

$$\boldsymbol{B} = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma c}$$
Equação 1

onde:

 $\Delta u$ : excesso de poropressão gerado,

 $\Delta \sigma_c$ : acréscimo de tensão confinante aplicado.

Para as amostras constituídas de argila foram considerados aceitáveis valores de B maiores ou iguais a 0,95 enquanto que para os corpos de prova confeccionados com areia os valores de parâmetro B aceitáveis foram maiores ou iguais a 0,87. Além de medir o parâmetro B, era monitorada a quantidade de água que percolava através da amostra, considerando-se saturada quando se atingia um volume percolado de duas vezes o volume de vazios do corpo de prova.

## • Adensamento e Cálculo do t<sub>100</sub>

Atingida a saturação do corpo de prova, iniciava-se a fase de adensamento isotrópico. O adensamento durava, em média, 24 horas. Nesse tempo, os dados da variação de volume eram coletados.

Com estes dados se traçava o gráfico variação volumétrica (ml) x raiz do tempo (min<sup>0,5</sup>). Segundo a recomendação de Head (1986), prolongava-se o trecho retilíneo inicial até encontrar a prolongação horizontal do trecho final. Este último trecho corresponde à estabilização das variações de volume. O ponto de interseção destas duas linhas prolongadas fornecia a raiz de  $t_{100}$  (min<sup>0,5</sup>) no eixo das abscissas. Logo com o valor de  $t_{100}$  (min) se calculava a velocidade de cisalhamento.

### Cálculo da velocidade de cisalhamento e etapa decisalhamento no ensaio triaxial

Como os ensaios triaxiais foram drenados, a expressão utilizada proposta por Head (1986) foi a seguinte:

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{\epsilon} \mathbf{f} \cdot \mathbf{L}}{\mathbf{100.tf}} \qquad \qquad \text{Equação 2}$$

onde:

v: velocidade máxima de cisalhamento em mm/min,

L: altura do corpo de prova em mm,

 $\epsilon_f$ : deformação axial estimada na ruptura em %,

t<sub>f</sub>: tempo mínimo de ruptura em minutos.

O valor de t<sub>f</sub> para este tipo de ensaio triaxial (CID – sem drenagem radial) é de 8,5 vezes o valor de t<sub>100</sub>. Contudo, Head (1986) propõe um valor mínimo para t<sub>f</sub> de 120 min.

O objetivo de definir uma velocidade suficientemente lenta para a aplicação da compressão axial é permitir a total drenagem da água do corpo de prova sem gerar excesso de poropressão.

Todos os valores obtidos de t<sub>f</sub> para os corpos de prova de solo argiloso, de areia e das misturas, foram menores que 120 minutos. Portanto, adotou-se t<sub>f</sub> = 120 minutos. Assim, definiu-se que a ruptura ocorreria para uma deformação axial de 5% e dessa maneira a velocidade máxima (v) calculada foi a mesma para todos os ensaios (0,033 mm/min), sendo a velocidade adotada igual a 0,030 mm/min.

Com a velocidade de cisalhamento definida, o passo seguinte era a colocar um par de engrenagens na prensa, que define a velocidade desejada. Para os cálculos foi adotado 18% de deformação axial como deformação máxima no caso do solo argiloso e 17% no caso do solo arenoso.

Para os ensaios triaxiais, as variantes de tensão q (tensão de desvio) e p' (tensão efetiva média normal) foram calculados com as formulações de Lambe. Para os parâmetros de resistência do solo utilizou-se os valores da envoltória de resistência ( $\alpha$ ') e da coesão (a') obtida no espaço p':q para calcular os parâmetros de resistência no

espaço Mohr Coulomb ( $\varphi'$  – c'). As formulações de Lambe e os parâmetros que são apresentados nos gráficos dos resultados definem-se como:

$$q = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2}$$
 Equação 3

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2}$$
 Equação 4

$$\tan(\alpha') = sen(\varphi')$$
 Equação 5

$$a' = c' \cdot \cos(\varphi')$$
 Equação 6

Onde: α': inclinação da envoltória de resistência no espaço p':q.

a': intercepto com o eixo q da envoltória de resistência no espaço p':q.

 $\varphi$ ': inclinação da envoltória de resistência do espaço  $\sigma$ : $\tau$  (Mohr Coulomb).

c': intercepto da envoltória de resistência do espaço  $\sigma$ : $\tau$  (Mohr Coulomb).

#### Ensaios de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com a bentonita e com as misturas solo-EPS, com objetivo de determinar a resistência ao cisalhamento do solo. Essa resistência é obtida através da obtenção dos parâmetros coesão (c) e ângulo de atrito ( $\phi$ ).

Estes ensaios foram realizados segundo os métodos descritos pela norma ASTM D 3080/2004. A seguir será descrito o método de preparação utilizado para a bentonita.

Para confecção dos corpos de prova da bentonita e misturas desta com os diversos teores de pérolas de EPS, a compactação do material foi realizada diretamente na caixa de cisalhamento e de forma manual.

As amostras de bentonita foram preparadas com 170% de umidade, que corresponde a um índice de vazios de 4,93. Para garantir que o material ficasse com todas as propriedades adequadas, calculou-se a quantidade certa de material seco que deveria ser adicionado à caixa de cisalhamento, realizando-se em seguida a mistura com

a quantidade de água e posteriormente com as porcentagens de EPS definidas. Com o auxílio de um gabarito, foi possível ajustar a altura adequada do material no equipamento. A Figura 3.16 apresenta um corpo de prova solo-EPS moldado a partir do procedimento explicado anteriormente.



Figura 3.16 - Corpo de prova Bentonita-EPS.

Para realização do ensaio, o corpo de prova foi colocado na caixa de cisalhamento metálica. A caixa é dividida horizontalmente em duas metades e a força normal é aplicada a partir do topo da caixa de cisalhamento no corpo de prova. A força de cisalhamento é aplicada movendo-se uma metade da caixa em relação à outra para provocar a ruptura. As caixas superior e inferior são distanciadas de 5,0 mm antes de se dar inicio à fase de cisalhamento do ensaio, para que possa haver o deslocamento relativo entre elas. Acima e abaixo do corpo de prova são colocadas placas ranhuradas, que fornecem atrito ao solo impedindo que este deslize quando aplicada a força horizontal, papéis filtro, para impedir o carreamento de partículas, e pedras porosas, para que a drenagem possa ocorrer livremente, estando o corpo de prova completo ou parcialmente saturado. O ensaio de cisalhamento direto realizado ocorreu com o controle da deformação, onde uma taxa constante de deslocamento cisalhante é aplicada na metade superior da caixa por um motor que atua por meio de engrenagens a uma velocidade determinada por um fator que vai de acordo com a carga aplicada verticalmente. Essa velocidade é calculada através dos dados da fase inicial do ensaio, chamada fase de adensamento, onde o corpo de prova é submetido somente à tensão vertical, e mede-se a variação de altura com o tempo, até que esta se estabilize. Através de um gráfico de deslocamento vertical versus raiz do tempo (t), obtém-se o valor de  $t_{100}$ , correspondente a 100% do adensamento, e calcula-se a velocidade a ser adotada na fase de cisalhamento. O tempo de adensamento foi estipulado em 24 horas.

Na fase de cisalhamento, a ruptura sofrida pelo corpo de prova ocorre ao longo do plano de divisão da caixa. O deslocamento horizontal da metade superior da caixa é medido por um LVDT (Linear Variable Differential Transformer ) horizontal, que funciona como um sensor para medição de deslocamento linear. As variações da altura do corpo de prova, ou seja, as variações do volume do mesmo ao longo do ensaio são obtidas através das leituras no LVDT vertical. O anel de carga mede a força horizontal variável à qual o corpo de prova está sendo submetido.

Os ensaios foram repetidos em corpos de prova similares, para cada solo e mistura. Adotou-se os valores de 50, 100 e 300 kPa para as tensões normais aplicadas. Através do gráfico da Tensão Cisalhante Máxima, que indica o momento da ruptura, versus Tensão Normal, pré-definida, determinam-se as envoltórias de ruptura e os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo. A Figura 3.17 ilustra o equipamento de cisalhamento direto utilizado na presente pesquisa.



Figura 3.17 - Prensa de cisalhamento direto.