

4 Equipamento e Metodologia de Ensaios

4.1 Introdução

O bom desempenho de um *liner* depende do comportamento mecânico e hidráulico do solo compactado. Os métodos de compactação mais utilizados no laboratório para avaliar o comportamento do solo são os de Proctor Normal, Proctor Modificado e compactação estática. Os dois primeiros constituem um meio para controlar a compactação de campo e, o último, é usualmente utilizado para moldar corpos de prova ou reconstituir amostras com densidade e umidade conhecidas. Para solos argilosos utilizados em barragens, diques e barreiras, eles parecem representar pobremente a compactação em campo que, usualmente, é realizada com equipamentos que aplicam pisoteamento (Kouassi *et al.* 2000), como por exemplo, o pé de carneiro.

Por muitos anos os ensaios Proctor têm sido utilizados para definir as condições de projeto dos *liners* e da maioria das obras de engenharia geotécnica. No entanto, se extrai a partir do estudo de Mitchell *et al.* (1965), que a compactação por pisoteamento, devido aos efeitos que produz na estrutura do solo, contribui com a redução da permeabilidade. Não existe na literatura, entretanto, informação extensa quanto a este tipo de ensaios em laboratório.

O pé de carneiro é um dos equipamentos mais utilizados na construção de barreiras com materiais argilosos, pois ele proporciona uma remodelagem e mistura profunda do solo (Hermann e Elsbuy, 1987), permitindo conseguir uma melhor aderência entre as camadas da barreira e destruir torrões de solo, o que é indispensável para reduzir a condutividade hidráulica. O ensaio de compactação por pisoteamento tenta reproduzir o efeito deste equipamento de campo em laboratório.

Moldando corpos de prova compactados com os dois métodos acima descritos (Proctor Normal e pisoteamento), será possível comprovar se existe ou não uma influência importante deles no valor da condutividade hidráulica obtida nos ensaios de permeabilidade.

Neste capítulo apresentam-se os equipamentos utilizados e as metodologias seguidas para chegar ao objetivo acima explicado.

Primeiramente faz-se uma descrição dos procedimentos seguidos para caracterizar os materiais em estudo. Em seguida, detalham-se os aspectos tanto dos ensaios de Proctor Normal como de pisoteamento; e por último, dos ensaios de permeabilidade.

4.2 Ensaio de Caracterização

A resposta a um problema de engenharia geotécnica é normalmente obtida a partir da determinação das propriedades do solo em questão. Os ensaios de caracterização permitem obter as propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos diferentes materiais, através de procedimentos padronizados em normas técnicas, sejam brasileiras ou internacionais. Neste estudo, foram utilizadas as normas recomendadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Os solos podem ser identificados pela textura, consistência, compacidade, estrutura, forma dos grãos, cor, cheiro, friabilidade, presença de outros materiais (conchas, matéria orgânica, etc.), minerais presentes, composição química, entre outros.

A seguir se apresenta um resumo dos ensaios de caracterização, assinalando em quais amostras foram executados:

Tabela 4.1-Resumo de ensaios de caracterização dos materiais em estudo.

Material	Caracterização Física	Caracterização Mineralógica	Caracterização Química
Solo	x	x	⊕
M1	x	-	-
M2	x	-	-
M3	x	-	-
Composto Orgânico	x	-	⊕

(x): ensaios executados

(⊕): resultados obtidos a partir da literatura

(-): ensaios não executados

Todos os dados e resultados obtidos dos ensaios apresentados na tabela anterior se apresentam no capítulo 5.

4.2.1 Caracterização Física

Os ensaios padrões para a caracterização física (análise granulométrica, peso específico dos grãos e limites de Atterberg) foram realizados em amostras deformadas de solo, assim como no composto e nas misturas M1, M2 e M3 no laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

Adotaram-se os procedimentos indicados nas seguintes normas da ABNT:

- NBR 6457/1986: Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização;
- NBR 6508/1984: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica;
- NBR 7181/1984: Análise Granulométrica;
- NBR 6459/1984: Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7189/1984: Determinação do Limite de Plasticidade;

A Tabela 4.2 mostra os ensaios de caracterização física realizados nos diferentes materiais em estudo:

Tabela 4.2 – Resumo do programa de ensaios, caracterização física.

Material	Teor de Umidade Natural	Peso Específico dos Grãos	Granulometria	Limites de Consistência
Solo	x	x	x	x
M1	x	x	x	x
M2	x	x	x	-
M3	x	x	x	-
Composto Orgânico	x	x	x	-

(x): ensaios executados

(-): ensaios não executados

4.2.2 Caracterização Mineralógica

A mineralogia é fundamental para o entendimento das propriedades geotécnicas, pois dela dependem a interação do solo com fases líquidas, o tamanho, forma e superfícies características das partículas sólidas. Todos estes fatores juntos justificam o comportamento do material quanto à plasticidade, expansibilidade, compressibilidade, resistência e condutividade hidráulica (Mitchell, 1993).

Segundo o autor supracitado a fase sólida de um solo pode conter várias quantidades de argilominerais e minerais não argilosos cristalizados,

argilominerais não cristalizados, matéria orgânica e sais precipitados. Usualmente, os minerais cristalizados conformam à maioria dos solos usados na prática da engenharia, porém a quantidade dos minerais não argilosos supera a de argilominerais. No entanto, os argilominerais e a matéria orgânica presentes no solo, usualmente dominam as suas propriedades, independentemente da sua abundância no material.

Para identificar a microestrutura do solo, análises de microscopia óptica e eletrônica de varredura foram realizadas por Soares (2005), a partir de lâminas de material indeformado extraído do mesmo local da amostragem deste estudo.

A composição qualitativa do material foi determinada no Laboratório de Difractometria de Raios-X do DCCM da PUC-Rio através do ensaio de difração de raios-X. Foi preparada uma lâmina de material pelo método de gotejamento com o material passante na peneira #200. Foi utilizado um difratômetro modelo D5000 de marca Siemens. O ensaio foi feito com uma velocidade de varredura de 0,02 graus/s.

4.2.3 Caracterização Química

O conhecimento das propriedades químicas dos materiais - solo e composto orgânico - em estudo é de grande importância, pois delas depende a interação entre ambos.

Análises referentes às propriedades químicas do solo têm sido realizadas por vários pesquisadores. A análise química total em percentagem em peso foi extraída do estudo desenvolvido por Sertã (1986). Dados da capacidade de troca catiônica e de ataque sulfúrico foram obtidos do trabalho de Duarte (2004).

Quanto ao composto orgânico, o teor de matéria orgânica foi determinado no laboratório da PUC-Rio com base na norma NBR 13600/1996 da ABNT. Cabe mencionar que foram executados dois ensaios, nos quais foram modificados aspectos da norma quanto à temperatura.

Segundo Antunes, 2006, a temperatura necessária para que ocorra queima de matéria orgânica é de 400 °C. A partir de 500 °C, dependendo dos minerais presentes no material, é muito provável que ocorra a perda de água não livre, alterando a estrutura do material. Por esta razão o autor supracitado sugeriu executar um ensaio com temperatura de 500 °C e outro a 400 °C, embora a norma exija que se faça a uma temperatura de 440 °C.

Três amostras do composto orgânico foram colocadas em cadinhos de porcelana e secadas na estufa de 110 °C por um período de 24 horas. Posteriormente, foram introduzidas na mufla, a uma temperatura de 500 °C por um período de quatro horas e em seguida retiradas, esfriadas e pesadas. Repetiu-se esse procedimento mantendo a mesma temperatura, porém com intervalos de tempo de duas horas até atingir massa constante. A diferença de massa no início e no final do ensaio representa o teor de matéria orgânica do composto.

O segundo ensaio consistiu em aplicar o mesmo procedimento com uma variação no tempo inicial e a temperatura. As cápsulas com o composto permaneceram dentro da mufla durante seis horas a uma temperatura de 400 °C. Repetiu-se esse procedimento mantendo a mesma temperatura e com intervalos de tempo de duas horas até atingir massa constante.

O teor de matéria orgânica (MO) é obtido com a seguinte equação:

$$MO = \left(1 - \frac{b}{a}\right) \cdot 100 \quad (4.1)$$

onde:

MO: teor de matéria orgânica em porcentagem;

a: massa da amostra seca em estufa, à temperatura de 110 °C, em gramas;

b: massa da amostra queimada em mufla (gramas), à temperatura de 500 °C para o primeiro ensaio ou a 400 °C para o segundo.

Análises mais complexas, como determinação da composição química, teores de ácidos húmicos (AH), fúlvicos (AF) e extrato húmico total (EHT), entre outros foram realizados pela EMBRAPA (dados apresentados no Apêndice A).

4.3 Ensaio de Compactação

A estrutura do solo obtida após o processo de compactação está diretamente relacionada com o equipamento utilizado para este fim (Mitchell *et al.*, 1965; Hermann e Elsbury, 1987).

Segundo vários autores (Day e Daniel, 1985; Benson e Daniel, 1990; Houston e Randeni, 1992; Rowe *et al.*, 1995; Benson *et al.*, 1999) é possível conseguir uma permeabilidade baixa com a eliminação das estruturas flocladas no solo (grumos) onde geralmente existem macroporos que facilitam o fluxo.

Para isto é necessário que a compactação seja feita no ramo úmido usando um equipamento que transmita uma energia de compactação elevada e que seja capaz de produzir grandes deformações, como é o caso dos compactadores do tipo pé de carneiro (Mitchell, 1993; Benson e Boutwell, 2000).

Em laboratório, o método mais utilizado para simular as condições de compactação em campo é o ensaio Proctor (Normal ou Modificado) que transmite uma energia dinâmica ao solo. No entanto, este pode não representar adequadamente o que acontece com o solo quando submetido a uma energia estática (pé de carneiro) que se acredita eliminar mais eficientemente os grumos no solo responsáveis pelo aumento da permeabilidade.

O compactador pneumático pretende simular o efeito produzido por tal equipamento no laboratório.

A reprodução adequada dos procedimentos de compactação realizados em campo é de extrema importância, pois resultados mais realistas podem ser obtidos a partir dos ensaios de laboratório.

O objetivo principal desta série de ensaios é simular a compactação do pé de carneiro por meio do ensaio de pisoteamento no laboratório, e por sua vez analisar se realmente ocorre uma mudança significativa na estrutura do material (com respeito à obtida com o ensaio Proctor Normal), que se veja refletida posteriormente nos ensaios de permeabilidade.

É importante ressaltar que neste trabalho não se pretende comparar energias de compactação diferentes, e sim, procurar uma equivalência entre ambas, para analisar o seu efeito na estrutura final do solo compactado.

4.3.1 Proctor Normal

4.3.1.1 Descrição do Equipamento

O equipamento básico consiste de um soquete de 2,5 kg, um molde cilíndrico metálico com diâmetro de 10 cm e altura de 12,73 cm e um anel complementar metálico que permite a compactação da terceira camada de material dentro do cilindro. São necessários alguns acessórios como régua de aço biselada, espátula de lâmina flexível, um extrator de amostra, etc.

A seguinte figura apresenta os acessórios básicos para executar o ensaio:



Figura 4.1-Instrumentos do ensaio Proctor Normal.

4.3.1.2 Metodologia do Ensaio

Após secar o material em uma estufa a 35 °C ou ao ar até se obter um teor o suficientemente baixo de umidade para destorroá-lo, passa-se pela peneira #4, segundo a norma NBR 6457/86 (preparação com secagem prévia até a umidade higroscópica).

Adiciona-se uma determinada quantidade de água destilada ao material, até que este fique com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima, que pode ser estimada *à priori* pelo conhecimento do limite de plasticidade, cujo valor é muito próximo à umidade ótima. Homogeneíza-se bem a mistura e uma porção dela coloca-se dentro do molde cilíndrico. Aplica-se 26 golpes com um soquete

de massa de 2,5 kg que se deixa cair a uma altura de 30,5 cm na camada de solo. A porção do solo compactado deve ocupar cerca de um terço da altura total do molde. O material é escarificado para conseguir uma melhor aderência entre as camadas. A segunda camada é colocada e o procedimento é repetido. Quando se completam três camadas, atinge-se uma altura maior do que a do molde. Isto é possível porque o molde, cuja altura é de 12,73 cm, possui um anel complementar, que é removido ao final do ensaio, e permite então, retirar o excesso e acertar o volume com respeito à altura do molde.

O cilindro é pesado junto com o solo. Assim, com o peso total do corpo de prova e o volume é possível calcular a sua massa específica. Tirando três amostras do seu interior (na parte média), determina-se sua umidade. Com estes dois valores, calcula-se a massa específica seca.

Para os ensaios de compactação com reuso, o corpo de prova obtido e pesado anteriormente, é destorreado e é acrescentada uma maior quantidade de água (para aumentar a sua umidade em uns 2% aproximadamente). Uma nova compactação é feita e um novo par de valores umidade-massa específica seca é obtido. O procedimento se repete até que a densidade seca máxima obtida nos ensaios prévios reduza duas ou três vezes.

Com todos os pontos obtidos, plota-se um gráfico de massa específica seca versus umidade, e com eles, desenha-se a curva de compactação.

No caso dos ensaios sem reuso de material, o procedimento é idêntico, só que para cada ponto, utilizam-se amostras virgens.

Numerosos autores afirmam que este último tipo de ensaio oferece um resultado mais fiel, pois no caso de solos que possuem partículas muito quebradiças, a discrepância que poderia existir entre um ponto e outro na tendência da curva de compactação é eliminada. No entanto, é pouco realizado, pois precisa de uma quantidade muito maior de material (cerca de 3,0 kg) para cada ponto (NBR 6457/86).

O procedimento acima descrito segue a norma NBR 7182/86 da ABNT, a qual tem algumas diferenças com respeito às normas internacionais (por exemplo, o número de golpes e as dimensões do molde).

No presente trabalho foram realizados ensaios tanto sem reuso como com reuso. Verificou-se que não houve diferenças significativas entre eles, pois todos os pontos obtidos seguiram uma mesma tendência e definiram a curva satisfatoriamente.

4.3.2 Pisoteamento

4.3.2.1 Descrição do Equipamento

O equipamento que permite a compactação por pisoteamento, projetado e desenvolvido na PUC-Rio (de Campos, 1988) é aqui denominado de compactador pneumático (Figura 4.3). O compactador consta de um reservatório cilíndrico de ar comprimido (alimentado por um compressor) com manômetro, uma mangueira que transmite pressão de ar quando uma alavanca é acionada, uma haste de compactação com sapata trocável na extremidade inferior, mesa para apoio do cilindro e um dispositivo (lâmpada) indicador de pressão. A sapata utilizada em todos os ensaios deste trabalho possui um diâmetro de 1,9 centímetros.

Para conter o material que será compactado, tem-se um molde cilíndrico tripartido. Este se apóia em uma base de alumínio. O cilindro é fixado com parafusos na base e confinado no meio e no topo por meio de anéis.

Na Figura 4.2 são mostrados os acessórios utilizados para executar o ensaio por pisoteamento:



Figura 4.2-Molde tripartido, base de alumínio e anéis médio e superior de confinamento; amostra de solo obtida a partir do pisoteamento; outros acessórios.



Figura 4.3-Compactador Pneumático.

4.3.2.2 Metodologia do Ensaio

A preparação da amostra é a mesma que nos ensaios de Proctor Normal, mas no caso do pisoteamento, todos os ensaios foram feitos sem reuso de material. Para cada ensaio de compactação são precisos aproximadamente 250 gramas de material (dependendo do seu peso específico). A quantidade de água para atingir a umidade desejada é adicionada ao material, misturando-se até conseguir uma massa uniforme. Finalmente, se armazena em uma sacola

plástica fechada por um tempo mínimo de 24 horas para que a umidade se equalize.

Antes de executar o ensaio de compactação, a amostra é misturada novamente para garantir a homogeneidade.

O molde é limpo, secado e lubrificado com vaselina para evitar o atrito entre o material e o molde, e facilitar a retirada do corpo de prova. O cilindro tripartido é montado na base e parafusado. Um anel metálico no meio e um outro no topo confinam o molde (Figura 4.4). Ambos os anéis são fixados com parafusos.



Figura 4.4-Molde cilíndrico tripartido e anéis de confinamento.

Ajusta-se a pressão desejada no manômetro através de uma válvula reguladora (Figura 4.5A).

A primeira camada de material é colocada dentro do molde e nivelada com uma sapata de acrílico do mesmo diâmetro do cilindro (Figura 4.5B). Procede-se a compactar o material na pressão desejada, escarificar e colocar a seguinte camada de material.

A compactação é feita quando se aplica manualmente uma força por meio de uma alavanca que mobiliza uma haste. A pressão lida no manômetro é transmitida ao solo quando se dá o contato dele com a sapata da haste (Figura 4.5C). Uma luz acende no equipamento quando a pressão desejada é atingida (Figura 4.5D). Nesse momento, passa-se para a posição seguinte da seqüência de pisoteamento conforme a Figura 4.6.

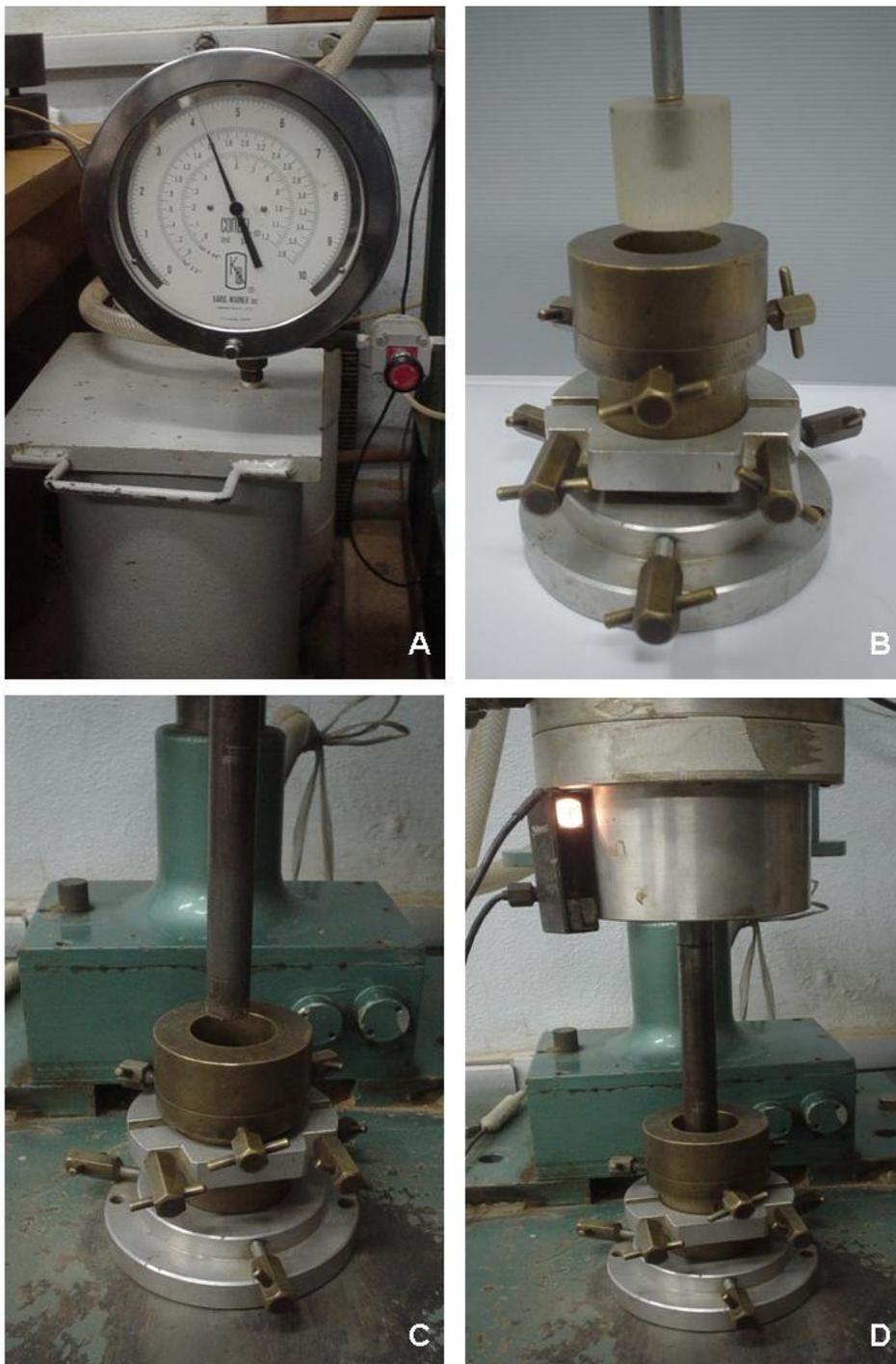


Figura 4.5-Rotina do ensaio de pisoteamento.

As primeiras quatro apisoadas devem ser aplicadas em quadrantes opostos, assegurando-se de que a haste esteja sempre em contato com as paredes do cilindro. Uma quinta apisoada deve ser dada no centro da amostra, e o resto, seguindo a padrão dos quadrantes opostos, espaçados dos primeiros quatro pontos, e sempre seguidos de uma aplicação de pressão no centro.

A seguinte figura apresenta a seqüência de pisoteamento seguida durante todos os ensaios.

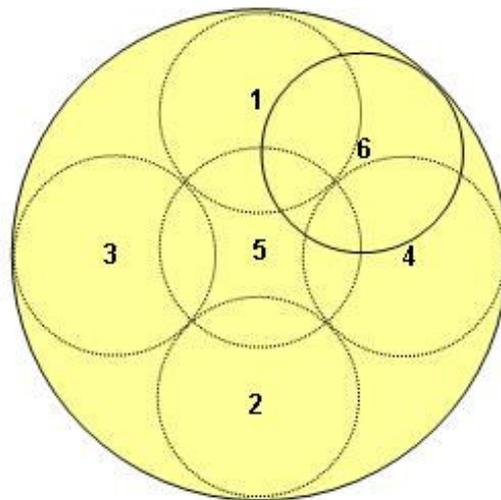


Figura 4.6-Seqüência de pressão aplicada no solo por meio do equipamento de pisoteamento.

Definiu-se executar o ensaio de pisoteamento em três camadas, dando 25 apisoadas em cada uma delas e escarificando o material para garantir a aderência da camada seguinte.

O número de camadas e o número de golpes por camada podem variar segundo critério pessoal. Para definir isto, é importante analisar a uniformidade da energia de compactação aplicada a todo o volume do corpo de prova, a distribuição uniforme da energia de compactação na superfície de cada camada e a viabilidade de execução. Montenegro (1983), por exemplo, utilizou um equipamento similar ao compactador pneumático, mas o ensaio foi feito em 10 camadas, aplicando 27 golpes por camada e transmitindo ao solo 10 kgf por golpe. Sua escolha se baseou nos padrões de compactação por pisoteamento utilizados no Instituto de Engenharia, UNAM, México, onde foi desenvolvido o equipamento utilizado pela autora. Equipamentos alternativos para realizar os ensaios de pisoteamento, bem como diferentes distribuições de camadas, tamanho de molde, entre outros são propostos por Bell (1977) e Kouassi *et al.* (2000) entre outros. Existem poucos exemplos na literatura que discutam aspectos quanto à compactação por pisoteamento. Cada um deles adota um padrão de ensaio, mas por enquanto não existe uma norma que unifique critérios quanto ao tamanho do corpo de prova, o número de camadas a utilizar, o número de golpes nem o diâmetro da sapata. O único critério que existe

atualmente para responder se os parâmetros definidos para a realização do ensaio foram ou não adequados, é a partir da análise dos resultados experimentais.

4.3.3

Relação Entre o Ensaio Proctor Normal e Pisoteamento

Para poder comparar os efeitos dos distintos métodos de compactação na permeabilidade dos materiais em estudo, foi necessário determinar uma equivalência entre o método de compactação de Proctor Normal (energia dinâmica) e o método de compactação por pisoteamento (energia estática).

Para conseguir isto, foi realizado um ensaio de Proctor Normal para obter a curva de compactação e, por conseguinte, obter a umidade ótima e a massa específica seca máxima correspondente a cada um dos materiais, bem como as massas específicas secas correspondentes às umidades $W_{ot+3\%}$ e $W_{ot-3\%}$, com o objetivo de analisar os efeitos do método de compactação na condição ótima, no ramo úmido e no ramo seco da curva. Os resultados dos ensaios Proctor Normal são apresentados no capítulo 5.

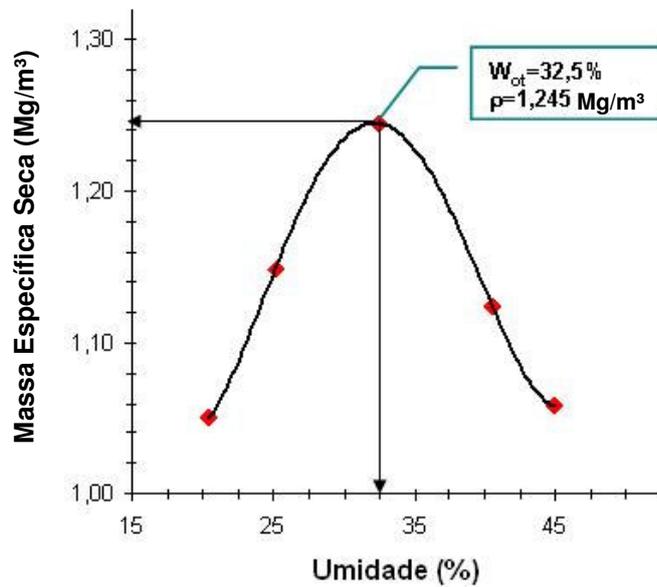
Posteriormente, foram feitos ensaios de pisoteamento para cada material, mantendo-se uma determinada umidade (W_{ot} , $W_{ot+3\%}$, ou $W_{ot-3\%}$) e variando-se as pressões. Com esses dados, construíram-se gráficos de massa específica seca versus pressão. Com o objetivo de achar uma pressão equivalente, associou-se o valor da massa específica seca obtida no ensaio de Proctor para cada umidade, com um valor de pressão no gráfico do pisoteamento. Assim, foi achado um valor de pressão em libras por polegada quadrada (psi) a ser utilizado no equipamento para cada tipo de material com cada uma das umidades em estudo (W_{ot} , $W_{ot+3\%}$, $W_{ot-3\%}$). Foram analisadas regressões lineares, exponenciais, potenciais e logarítmicas, sendo as últimas as que melhor se ajustaram ao comportamento dos materiais quando submetidos ao pisoteamento.

Com a pressão equivalente já determinada, foram moldados corpos de prova com o compactador pneumático para atingir o mesmo grau de compactação que o conseguido com o Proctor Normal. Assim, os dados obtidos a partir dos ensaios de permeabilidade para corpos de prova moldados com os dois diferentes métodos de compactação poderão ser comparados.

Detalhes do processo experimental para a definição da faixa de pressão utilizada no compactador pneumático são mostrados no capítulo 5.

A seguir, mostra-se um gráfico explicativo da definição de pressão equivalente:

Curva de Compactação, Proctor Normal



Curva de Massa Específica Seca versus Pressão Aplicada

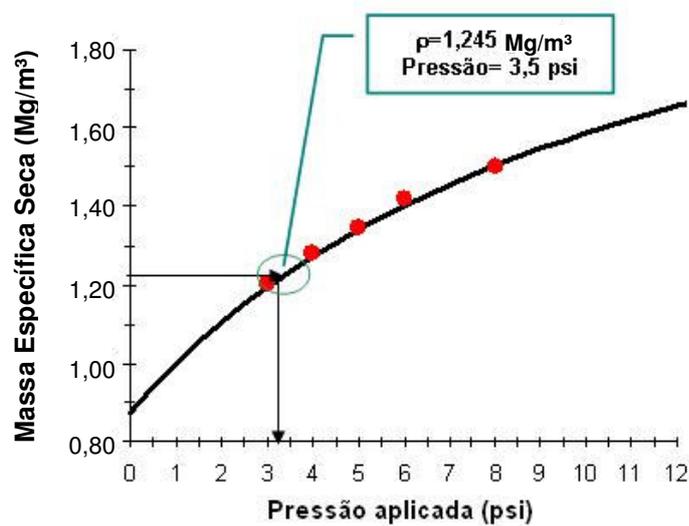


Figura 4.7-Relação entre a curva de compactação do Proctor Normal e a curva de massa específica seca *versus* pressão aplicada (curva de pisoteamento, regressão logarítmica) para a determinação da pressão equivalente.

4.4 Ensaio de Permeabilidade

A partir destes ensaios espera-se obter a permeabilidade saturada dos materiais em estudo quando compactados com dois métodos distintos (Proctor Normal e pisoteamento) em diferentes umidades.

Com esta finalidade foi desenvolvido um equipamento, que consta de quatro permeômetros de parede flexível, dois frascos de Mariotte para aplicar carga constante de água, uma coluna de água para aplicar tensão confinante nas câmaras e quatro balanças (cada uma localizada na saída de um permeômetro e ligada a um sistema de aquisição de dados). O objetivo de usar este equipamento era saturar as amostras por percolação para posteriormente determinar a permeabilidade saturada. Sua confecção demorou um mês aproximadamente. Um esquema detalhado, assim como o funcionamento dele é apresentado no apêndice B.

As primeiras duas amostras colocadas no equipamento foram compactadas na umidade ótima por pisoteamento; uma delas correspondente à M1 e a outra à M2. A altura inicial dos corpos de prova era de 7,86 cm aproximadamente. Foram aplicados um gradiente de 10 e uma carga constante durante uma semana. Como se observou que não saía nenhum efluente da amostra, os ensaios foram desmontados.

Novas amostras foram compactadas (todas pelo método de pisoteamento), moldadas e montadas nos quatro permeômetros disponíveis: duas da M1 (W_{ot} e W_{ot+3}) e duas da M2 (W_{ot} e W_{ot+3}). A altura usada desta vez foi de 4 cm para tentar saturar o solo mais rápido.

Em dois dos quatro ensaios, a percolação foi relativamente rápida; entretanto, nos outros dois não saiu água do sistema. Todas as amostras foram desmontadas para verificar se o equipamento apresentava algum problema, constatando-se que em todos os casos, funcionava corretamente. Com isto comprovado, montaram-se mais quatro amostras. Esperou-se uma semana e saiu uma quantidade insignificante de água. Os corpos de prova permaneceram por mais uns dias na câmara, observando-se que a vazão era insignificante e que com essa velocidade de ensaio não seria possível cumprir o programa planejado. Tentou-se saturar as amostras por vácuo, mas este processo se apresentou lento também. Só havia uma bomba de vácuo disponível para quatro câmaras e, além disso, existia a possibilidade de modificar as características iniciais dos corpos de prova com a aplicação de um vácuo elevado. Por estes

motivos e após várias semanas de tentativas sem êxito, tomou-se a decisão de trocar o equipamento.

A diferença entre o sistema anteriormente descrito e o equipamento utilizado para completar o programa de ensaios é a possibilidade de saturar as amostras por contrapressão neste último, fazendo-se com que o procedimento seja muito mais rápido. Todos os detalhes deste equipamento estão explicados nos itens seguintes.

4.4.1 Descrição do Equipamento

O equipamento utilizado consiste de cinco permeâmetros de parede flexível, sistemas de ar comprimido ou coluna de mercúrio para aplicar tensão confinante dentro das câmaras, painéis de válvulas reguladoras, interfaces ar-água, medidores de variação de volume e transdutores de pressão.

Cada transdutor de pressão e cada medidor de variação de volume estão conectados a um sistema eletrônico de aquisição de dados (Orion SI3531D, Data Acquisition System). O Orion permite registrar uma série de dados ao longo do tempo (Figura 4.8).

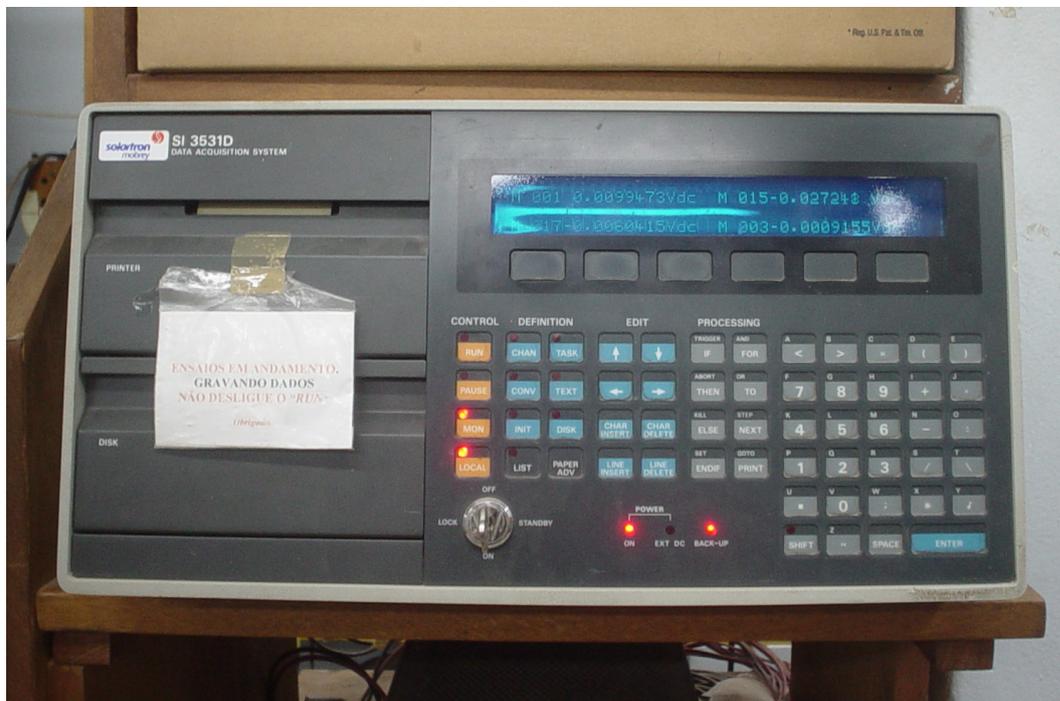


Figura 4.8-Sistema de aquisição de dados.

As câmaras do sistema são de acrílico e capazes de suportar uma tensão confinante máxima de 1000 kPa.

Os cinco permeâmetros têm algumas diferenças físicas, mas o funcionamento é basicamente o mesmo. Três das câmaras possuem um pedestal de alumínio e um cabeçote (ou “cap”) de acrílico, com diâmetro de 1 ½ polegadas, e são utilizadas quando o corpo de prova a ser colocado é moldado por pisoteamento. No caso dos dois permeâmetros restantes, o pedestal e o “cap” têm um diâmetro de 4 polegadas, portanto, podem ser colocadas as amostras moldadas a partir do Proctor Normal, cujo diâmetro é praticamente o mesmo. A tensão confinante em duas das câmaras com pedestal de 1 ½ polegadas é aplicada com pressão de ar, a qual está ligada ao interior da câmara. Nas outras, essa tensão é aplicada por meio de uma coluna de mercúrio.

Todas as válvulas reguladoras de pressão se encontram em painéis de controle ligadas ao sistema de aquisição de dados e à fonte de aplicação. Para aplicar a pressão no topo do corpo de prova, utiliza-se uma interface ar-água. A pressão de ar que sai do compressor chega à interface e pressiona o fluido que por sua vez transmite uma pressão de água para o corpo de prova. Para aplicar pressão na base, é utilizado um medidor de variação de volume automático tipo Imperial College (de Campos, 1985) que funciona da mesma forma que uma interface ar-água, com a diferença de que no meio existe um pistão que é empurrado com a pressão de ar aplicada, e a água que se encontra do outro lado do pistão é forçada a se movimentar.

Os detalhes do equipamento se apresentam no seguinte esquema:

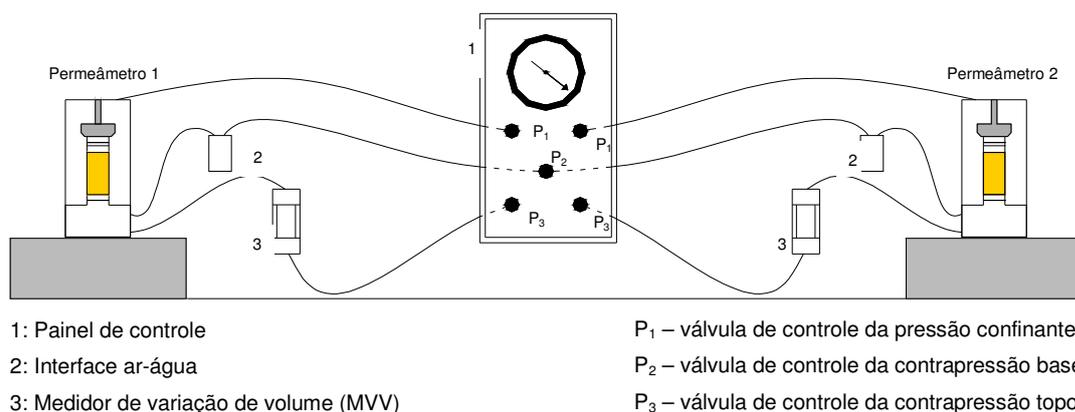


Figura 4.9-Esquema dos permeâmetros (Adaptada de Carvalho, 2006).

Na Figura 4.10 pode-se observar que todas as entradas de pressão se encontram na base da câmara. Nela, existem quatro válvulas: uma ligada ao interior da câmara por onde é aplicada a pressão confinante, outra ligada ao topo do corpo de prova, e duas outras, diametralmente opostas, ligadas à base da amostra. Estas válvulas devem se abrir para aplicar a pressão desejada no corpo de prova.

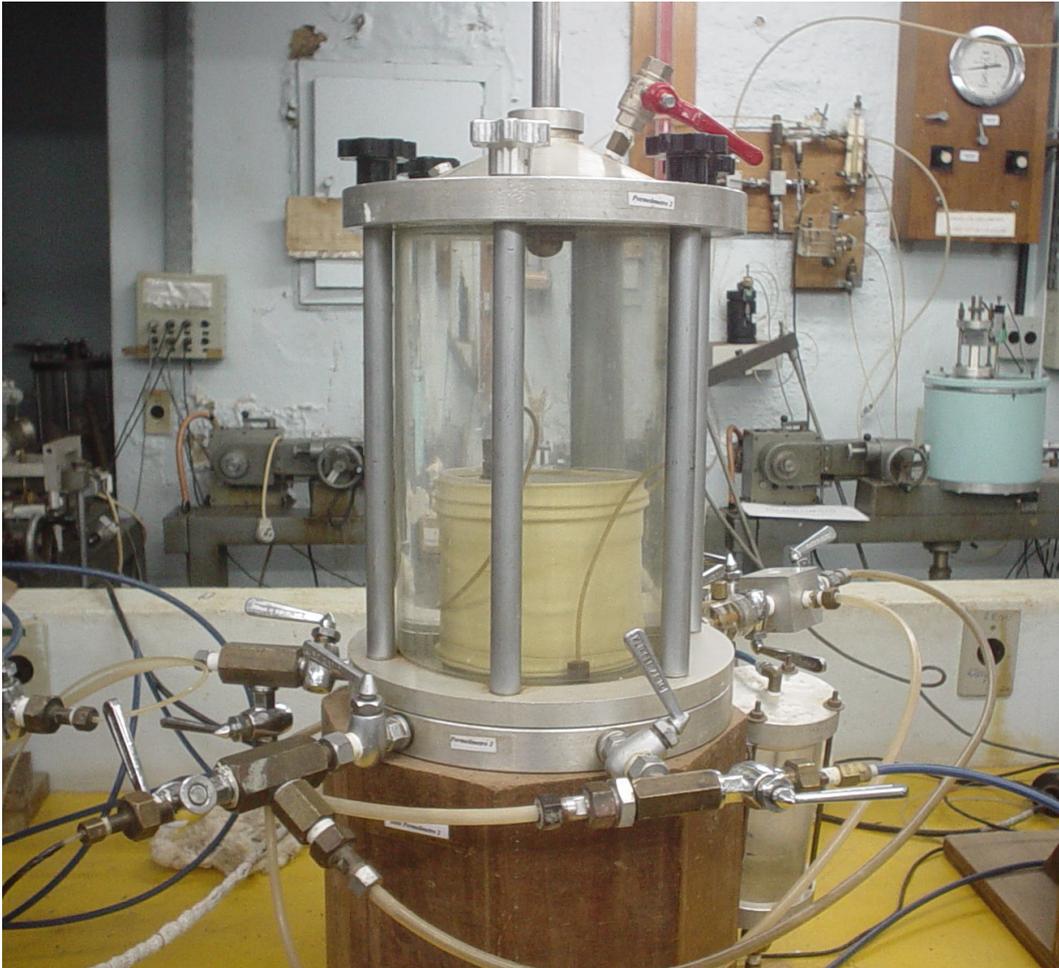


Figura 4.10-Detalhe permeâmetro de 4 ½ “.

4.4.2 Metodologia do Ensaio

4.4.2.1 Moldagem dos Corpos de Prova

Após ter compactado o material com uma determinada técnica (pisoteamento ou Proctor Normal) nas umidades W_{ot} , $W_{ot+3\%}$ e $W_{ot-3\%}$ para cada material, os corpos de prova são moldados, medidos, pesados e colocados em uma câmara de acrílico que permanece hermeticamente fechada durante o ensaio. O teor de umidade de cada um deles é previamente determinado.

Os corpos de prova compactados pelo método de pisoteamento foram colocados da mesma forma em que foram extraídos do molde de compactação. No caso das amostras compactadas com Proctor Normal, elas foram cortadas para ficar com uma altura de aproximadamente 7 cm.

É importante mencionar que os corpos de prova, tanto de pisoteamento como de Proctor Normal foram moldados no instante de serem montados nos permeâmetros. A preparação do material para a compactação foi a mesma para ambos: separou-se a quantidade de material necessária para cada ensaio e determinou-se após 24 horas a sua umidade. Com esse dado, calculou-se a quantidade de água necessária a adicionar para atingir a umidade desejada de compactação. A água e o solo foram misturados e homogeneizados. Finalmente, o material foi armazenado em uma sacola plástica por um tempo de cura mínimo de 24 horas e posteriormente, compactado. Antes de compactar, foi dado um revolvimento adicional da amostra (NBR 7182/1986).

A determinação da umidade de cada corpo de prova foi feita com uma porção da amostra remanescente na bandeja, retirada imediatamente após a compactação da segunda camada, e de acordo com a norma NBR 6457/86.

Cabe mencionar que a preparação dos materiais foi uma das etapas mais trabalhosas devido à dificuldade de atingir as umidades desejadas e ao problema do composto se rehidratar.

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 se mostra a altura dos corpos de prova utilizados nos ensaios de permeabilidade. Os diferentes valores são produto da expansão no sentido longitudinal que eles experimentam quando desconfinados.

Diametralmente não ocorreu nenhuma mudança nas dimensões. Os diâmetros para os corpos de prova compactados por pisoteamento e para os compactados por Proctor Normal são, respectivamente de 3,81 cm e 9,985 cm.

Tabela 4.3-Altura dos corpos de prova (em centímetros) compactados por pisoteamento, utilizados nos ensaios de permeabilidade.

PISOTEAMENTO			
Material	Umidade de compactação		
	$W_{ot-3\%}$	W_{ot}	$W_{ot+3\%}$
Solo	7,83	7,86	7,76
M1	7,84	7,76	7,84
M2	8,00	8,00	8,00
M3	8,00	8,14	8,10

Tabela 4.4-Altura dos corpos de prova compactados por Proctor Normal, utilizados nos ensaios de permeabilidade.

PROCTOR NORMAL			
Material	Umidade de compactação		
	$W_{ot-3\%}$	W_{ot}	$W_{ot+3\%}$
Solo	7,00	6,97	7,00
M1	7,00	7,05	7,00
M2	7,25	7,10	7,20
M3	7,20	7,10	7,10

4.4.2.2 Montagem

Inicialmente, o corpo de prova é colocado no pedestal dentro da câmara com papel filtro saturado e com pedras porosas saturadas em seus dois extremos (Figura 4.11). Posteriormente, é colocada uma membrana de látex presa com anéis de vedação na base e no cabeçote com a finalidade de impedir o fluxo de água entre a membrana e a amostra de solo (Figura 4.12 e Figura 4.13).

Todas as linhas são previamente saturadas para garantir a saída do ar antes de começar o ensaio e para conferir se as válvulas e o equipamento estão funcionando corretamente. As pedras porosas são limpas no ultra-som e saturadas antes de cada ensaio também. Como as pedras porosas, o papel filtro (da marca Whatman nº 54) deve estar saturado antes da sua colocação.

A câmara é preenchida com água e fechada (Figura 4.14).

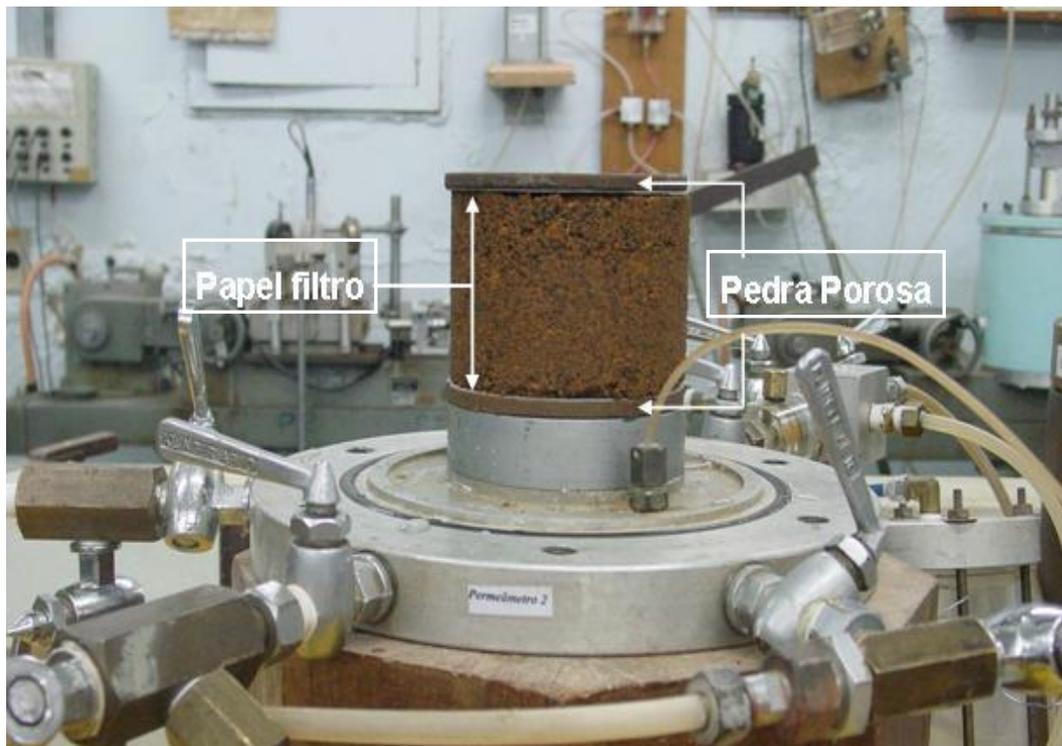


Figura 4.11-Montagem do corpo de prova para ensaio de permeabilidade.

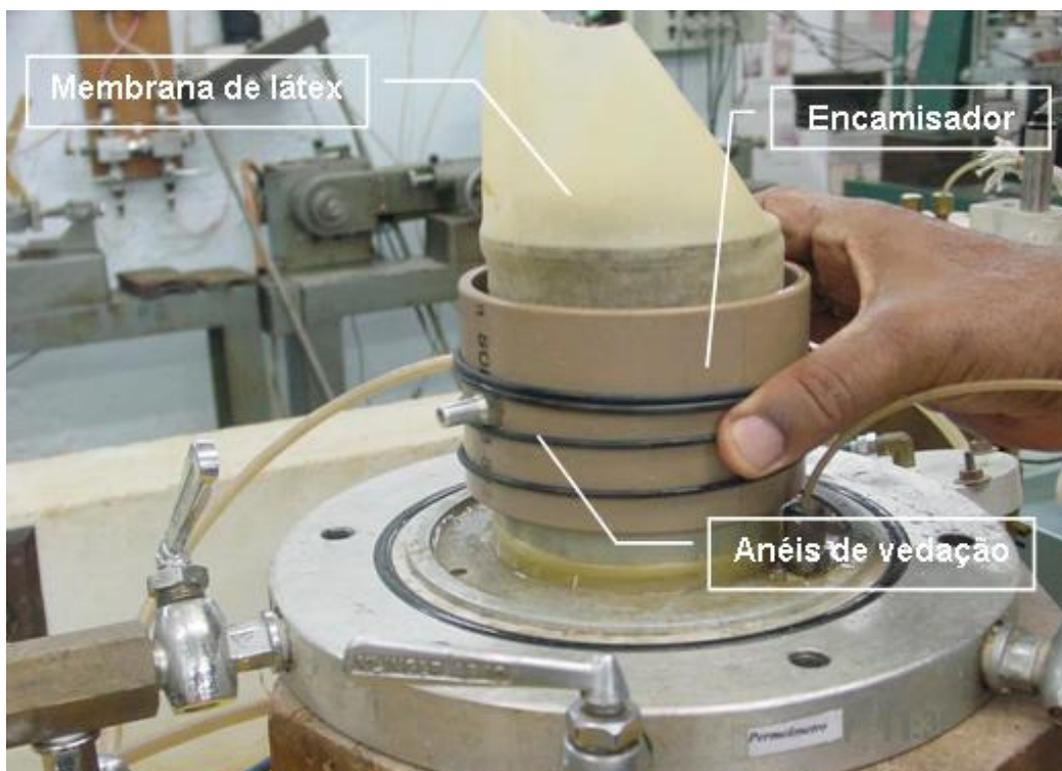


Figura 4.12-Colocação da membrana de látex no corpo de prova com ajuda do encamisador.

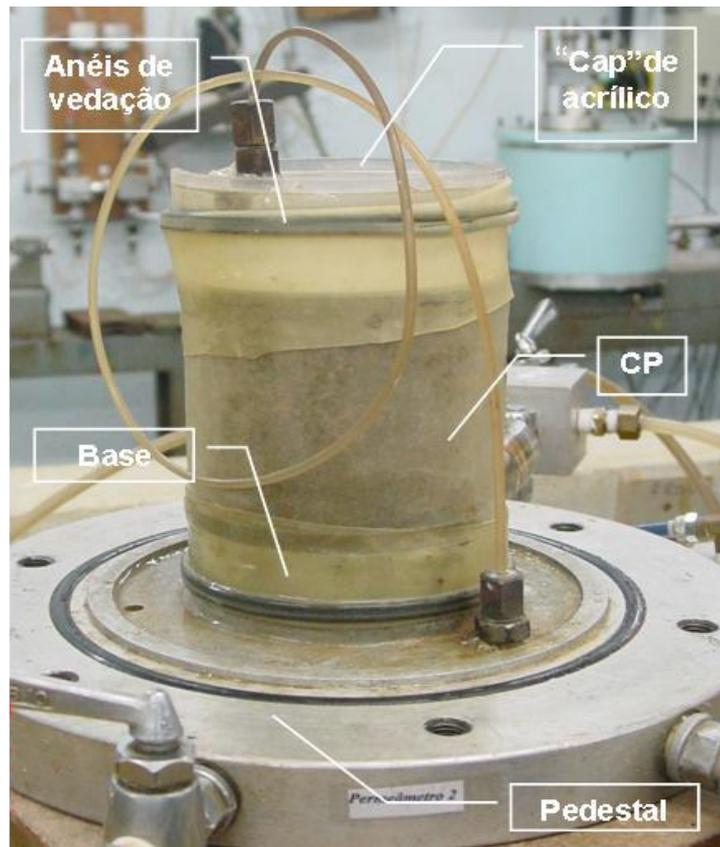


Figura 4.13-Montagem completa do corpo de prova no pedestal.



Figura 4.14-Preenchimento da câmara com água.

4.4.2.3 Saturação

O mecanismo de saturação adotado foi por contrapressão, o qual é vantajoso, pois permite atingir rapidamente a saturação do corpo de prova e dissolver bolhas de ar presentes.

Este consiste em aplicar uma tensão confinante e uma contrapressão (mesma pressão na base e no topo da amostra). Como o corpo de prova inicialmente não está saturado, o estado de tensão aplicado demora a se estabilizar dentro do solo. Quando isto ocorre, é aplicado um novo acréscimo em ambas as tensões, espera-se a resposta do solo e a estabilização da pressão. O procedimento se repete até que se cumpra com a condição de Skempton:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c} \quad (4.2)$$

Onde:

Δu – excesso de poropressão gerado;

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

Quando se atinge o parâmetro B igual a 1, significa que a resposta do solo (poropressão gerada) ante o acréscimo de tensão aplicado é do mesmo valor, portanto o solo está saturado. No caso dos ensaios realizados, considerou-se o corpo de prova como saturado quando $B > 0,96$.

Para todos os ensaios o excesso da pressão confinante com respeito à contrapressão aplicado (tensão efetiva) foi o mesmo em cada estágio (10 kPa), portanto, se assume que não ocorre adensamento; ou seja, o índice de vazios inicial é considerado o mesmo que o final.

Foi decidido aplicar um valor de tensão efetiva baixo, pois o valor de permeabilidade a se obter será mais crítico, quando comparado com a situação de campo, onde uma massa considerável de lixo será colocada, provocando uma tensão efetiva maior no liner e, portanto, uma condutividade hidráulica provavelmente menor.

A saturação dos corpos de prova foi alcançada para tensões confinantes superiores a 350 kPa.

4.4.2.4 Percolação

A percolação foi realizada com carga constante. Foi imposto um fluxo ascendente para permitir expulsar bolhas de ar que possam ter ficado presas no solo após a fase de saturação. O fluxo ocorre quando uma pressão maior é aplicada na base e uma menor no topo, ou seja, quando existe um gradiente de pressão. O gradiente utilizado em todos os ensaios foi de 9 a 10 aproximadamente⁴.

Como foi assumido que o corpo de prova antes da percolação se encontra saturado, pode-se afirmar que a vazão de entrada é igual à vazão de saída.

Um medidor de variação de volume se encontra conectado à base do corpo de prova e mede o volume de água que entra na amostra. Assim, o sistema eletrônico de aquisição de dados faz um registro desse volume de entrada (assumido como igual ao volume de saída) ao longo do tempo. Os dados são lidos pelo Orion como impulsos elétricos que podem ser transformados em volume através das equações de calibração existentes para cada medidor.

Com os dados de variação de volume *versus* tempo, pode se construir uma curva cuja inclinação é igual à vazão. Assim,

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (4.3)$$

Cabe mencionar que é importante esperar a vazão ficar constante ao longo do tempo, pois quando a percolação inicia, as pressões aplicadas no material têm que ser equalizadas.

⁴ Não foi possível manter o mesmo gradiente durante os ensaios devido às pequenas variações de pressão provocadas pelo atrito do Bellofram do medidor de variação de volume, quando o pistão se desloca como consequência da saída de água do corpo de prova. Outra limitação é que as válvulas do sistema não permitem fazer ajustes finos. O último fator importante a ser mencionado é que a altura dos corpos de prova foi similar, mas não a mesma para todos, devido à expansão deles quando desconfiados. A expansibilidade dos corpos de prova varia segundo o material. Quanto mais composto orgânico o material possua, maior a sua expansão. Todas estas razões fizeram com que os ensaios fossem realizados com gradientes que variam de 8,5 a 10 aproximadamente.

Assim que a vazão fica constante, pode ser calculada a permeabilidade saturada a partir da fórmula de Darcy:

$$k = \frac{i \cdot A}{Q} \quad (4.4)$$

Onde:

i = gradiente hidráulico;

A = área transversal do corpo de prova (cm^2);

Q = vazão (cm^3/s).

Como não foi possível manter o mesmo gradiente ao longo dos ensaios, o coeficiente de condutividade hidráulica k foi calculado ponto a ponto, e o valor global, é uma média de todos os valores no trecho estável de cada curva.

O procedimento descrito foi seguido para cada material (solo, M1, M2 e M3) em amostras com diferentes umidades ($W_{\text{ot}-3\%}$, W_{ot} e $W_{\text{ot}+3\%}$) e compactadas tanto por pisoteamento como por Proctor Normal.

O programa de ensaios de permeabilidade executados e o nome que foi dado a cada um deles para efeitos de simplificação dos dados mostram-se na Tabela 4.5 e na Tabela 4.6 respectivamente.

Tabela 4.5-Ensaio de permeabilidade executados.

Material	CP moldados com pisoteamento			CP moldados com Proctor Normal		
	$W_{\text{ot}-3\%}$	W_{ot}	$W_{\text{ot}+3\%}$	$W_{\text{ot}-3\%}$	W_{ot}	$W_{\text{ot}+3\%}$
Solo	$W_{\text{ot}-3\%}$	W_{ot}	$W_{\text{ot}+3\%}$	$W_{\text{ot}-3\%}$	W_{ot}	$W_{\text{ot}+3\%}$
M1	$W_{\text{ot}-3\%}$	W_{ot}	$W_{\text{ot}+3\%}$	$W_{\text{ot}-3\%}$	W_{ot}	$W_{\text{ot}+3\%}$
M2	$W_{\text{ot}-3\%}$	W_{ot}	$W_{\text{ot}+3\%}$	$W_{\text{ot}-3\%}$	W_{ot}	$W_{\text{ot}+3\%}$
M3	$W_{\text{ot}-3\%}$	W_{ot}	$W_{\text{ot}+3\%}$	$W_{\text{ot}-3\%}$	W_{ot}	$W_{\text{ot}+3\%}$

Os ensaios, como se observa na tabela acima foram realizados com amostras compactadas com métodos de compactação diferentes e com as mesmas umidades para cada um deles. Assim, denominar-se-ão com as três primeiras letras do abecedário, em ordem crescente com respeito ao teor de umidade, A, B e C. No caso dos corpos de prova moldados a partir do Proctor Normal, serão utilizadas, com a mesma finalidade, as letras D, E e F.

Tabela 4.6-Denominação dada aos diferentes ensaios de permeabilidade.

Método de Compactação		PISOTEAMENTO	PROCTOR NORMAL
Material	Umidade de Compactação	Nome ensaio	Nome ensaio
Solo	$W_{ot-3\%}$	SoloA	SoloD
	W_{ot}	SoloB	SoloE
	$W_{ot+3\%}$	SoloC	SoloF
M1	$W_{ot-3\%}$	M1A	M1D
	W_{ot}	M1B	M1E
	$W_{ot+3\%}$	M1C	M1F
M2	$W_{ot-3\%}$	M2A	M2D
	W_{ot}	M2B	M2E
	$W_{ot+3\%}$	M2C	M2F
M3	$W_{ot-3\%}$	M3A	M3D
	W_{ot}	M3B	M3E
	$W_{ot+3\%}$	M3C	M3F