

## 6 Conclusões e Sugestões

### 6.1 Conclusões

#### 6.1.1 Materiais

Quanto aos materiais utilizados, observou-se que o solo coluvionar foi o que apresentou o maior índice de plasticidade, menores limites de liquidez e de plasticidade. Estas propriedades mudaram inversamente com o a acréscimo de composto orgânico nas misturas.

Os problemas de repetitividade foram menores nos ensaios realizados com o solo coluvionar, pois as umidades de compactação utilizadas tanto no Proctor Normal como no pisoteamento, foram praticamente as mesmas, devido à fácil trabalhabilidade do material, ao contrário das misturas. No caso dos materiais com presença de composto, a variabilidade entre as umidades de compactação para ambos os métodos é maior, devido à dificuldade da preparação e homogeneização do material quando misturado com água; fato que seria desvantajoso no campo.

Um dos maiores problemas neste trabalho foi o de rehidratar o composto orgânico e atingir as umidades desejadas para moldar os corpos de prova a serem utilizados nos ensaios de permeabilidade. A homogeneização da umidade foi uma tarefa difícil também. Concluiu-se deste estudo, que a forma de preparação mais adequada no caso do composto orgânico, é não secá-lo, pois os problemas mencionados podem ser minimizados. Acredita-se que uma das mais importantes fontes de erro poder-se-ia associar com possíveis heterogeneidades nas umidades das amostras durante o processo de moldagem. Esta fonte de erro cresce com o teor de composto presente nas misturas.

A textura, as características físico-químicas e a mineralogia do solo, são bem conhecidas; não sendo assim com as misturas M1, M2 e M3; que, devido à presença do composto orgânico, têm propriedades e comportamento distintos ao

do solo. Segundo o afirmado por Mitchell (1976), o comportamento de um solo é controlado pelos argilominerais e pelo conteúdo de matéria orgânica, devido à atividade de ambos. A interação entre o solo e o composto foi superficialmente analisada por meio dos dados adquiridos a partir dos ensaios de compactação e permeabilidade, mas poderiam existir fatores físico-químicos, além dos estudados, que tenham eventualmente influenciado alguns dos resultados.

Os resultados obtidos a partir da moldagem dos corpos de prova para M2 e M3, mostraram que a massa específica seca para as umidades quando compactadas pelos distintos métodos, teve praticamente a mesma ordem de grandeza. Acredita-se que o tempo de cura, em alguns casos superiores às 24 horas, tenha influenciado nestes resultados.

Da relação entre a massa específica seca e a umidade de compactação, conclui-se que as massas específicas secas máximas decrescem com o aumento do teor de composto orgânico, porém a umidade ótima aumenta. Este comportamento era o esperado, já que a matéria orgânica possui menor peso específico e absorve uma maior quantidade de água.

### **6.1.2 Permeabilidade**

A partir dos gráficos de coeficiente de permeabilidade *versus* umidade de compactação apresentados no capítulo 5, observou-se que, o método de compactação, influencia o valor da condutividade hidráulica. No entanto, o efeito produzido pelos métodos (pisoteamento e Proctor Normal) no valor de  $k$  pode ser significativo, ou ao contrário, insignificante, dependendo das propriedades do material compactado e da umidade de compactação.

Isto se encontra exemplificado no Anexo I, onde as figuras ali apresentadas indicam que, para as amostras de solo compactadas na umidade ótima por ambos os métodos de compactação, não houve diferenças significativas entre as estruturas resultantes, concordando com os autores Seed e Chan (1959). Conseqüentemente, a diferença entre os valores de condutividade hidráulica de ambas as amostras foi mínima. Já no caso das amostras da M3 (compactadas na umidade ótima), observou-se uma influência importante do método de compactação na estrutura resultante e, por conseguinte nos valores de  $k$ , pois sob os efeitos do pisoteamento, os micro-agregados ou grumos formados por solo e composto orgânico apresentaram tamanhos menores que quando compactados por Proctor Normal.

No caso dos materiais estudados, a maior diferença de um método com respeito ao outro, quando utilizado em um mesmo material, na mesma  $w_o$ , foi de duas ordens de grandeza (M2 na  $W_{ot}$ ). Porém, como foi anteriormente explicado, em vários casos, a diferença entre os valores foi mínima, confirmando que a relevância dos efeitos do método de compactação é função das características do material e da umidade na que este se encontra.

Do ponto de vista da umidade de compactação, verificou-se que todos os materiais, quando compactados por Proctor Normal cumpriram com a relação  $k(w_{ot-3\%}) > k(w_{ot}) > k(w_{ot+3\%})$ . O solo e M1, quando moldados por pisoteamento também satisfazem a relação anterior.

Para M2 e M3, quando compactadas por pisoteamento, unicamente cumpre-se que  $k(w_{ot-3\%}) > k(w_{ot+3\%})$ . Contudo, a diferença entre ambos os valores é mínima. Quando moldada na  $w_{ot}$ , a condutividade hidráulica correspondente à M2 é a menor, e a correspondente à M3, é a maior entre todas as umidades de compactação ensaiadas no compactador pneumático. Este fato impossibilitou definir uma tendência de comportamento para os materiais anteriores. Fatores como discrepâncias na umidade de moldagem entre um método e outro, a natureza do composto orgânico e seus efeitos no comportamento das misturas podem ter influenciado os resultados obtidos.

A variação da condutividade hidráulica frente às variações da  $w_o$  foram mais pronunciadas nas amostras com menor teor de composto orgânico.

Conclui-se a partir das observações acima que, independentemente das massas específicas obtidas, a influência do teor de umidade durante a compactação do solo é de grande importância. Isto, porque a permeabilidade, segundo as teorias de Lambe e Olsen, é função da estrutura gerada no solo, que por sua vez, é conseqüência da quantidade de água presente no material durante o processo de densificação.

Do ponto de vista do equipamento de compactação utilizado, quando compactado pelo método de impacto, o solo, sendo o material mais plástico e com maior teor de argila entre os estudados, apresentou menores coeficientes de permeabilidade que quando compactado por pisoteamento. Nas umidades  $w_{ot}$  e  $w_{ot+3\%}$ , a diferença entre um método e outro foi menor que uma ordem de grandeza. No entanto, no caso da  $w_{ot-3\%}$ , o material se apresentou uma ordem de grandeza mais permeável quando compactado por pisoteamento.

Na M1 ocorreu o efeito contrário que no solo, sendo o método do pisoteamento o que proporcionou uma menor condutividade hidráulica no material. Para as misturas M2 e M3, não foi possível observar tão claramente,

como no solo e na M1, um padrão que evidencie a diferença entre ambos os métodos.

Quando os ensaios de permeabilidade foram realizados nas misturas M2 e M3, partículas de material coloidal, que ficaram livres devido ao excesso de composto orgânico presente nas misturas, foram translocadas na presença de um gradiente hidráulico, portanto sua remoção foi inevitável. Assim, quanto maior o teor de composto orgânico na mistura, maior foi a quantidade de material carregado na presença de fluxo.

Observou-se que o valor de  $k$ , no caso das misturas supracitadas, se manteve constante durante certo intervalo de tempo e posteriormente caiu (gráficos de coeficiente de permeabilidade versus umidade de compactação, apresentados no capítulo 5). Acredita-se que esta queda pode estar relacionada com a colmatação da pedra porosa, ou bem com uma eventual variação no índice de vazios na amostra, como conseqüência do carregamento de material e um possível adensamento durante a execução dos ensaios. A viscosidade do fluido percolante pode ter sofrido modificações devido aos sólidos suspensos carregados influenciando eventualmente o resultado de  $k$ .

Os fatores mencionados são só uma hipótese do que pode ter provocado este comportamento, porém, não há evidência de nenhum deles nos dados coletados. Apesar disto, o conhecimento do acontecido, é um importante aporte para avaliar os resultados.

Se alguma das hipóteses anteriores for válida, então poder-se-ia dizer que os resultados de permeabilidade obtidos no caso do solo e da M1 têm uma confiabilidade maior, pois o valor da condutividade hidráulica se manteve constante ao longo dos ensaios e pouco ou nenhum material foi carregado em presença de fluxo. No entanto, do ponto de vista do método de compactação, a M1 apresenta diferenças significativas entre as umidades de compactação das amostras moldadas com Proctor Normal e com pisoteamento; o que faz com que os resultados entre os métodos não sejam diretamente comparáveis.

Contudo, pode-se dizer que é necessário realizar um maior número de ensaios para conseguir estabelecer uma tendência clara quanto aos efeitos produzidos pelo método de impacto ou de pisoteamento na estrutura resultante das misturas estudadas e, conseqüentemente, na condutividade hidráulica. Já, no caso do solo, os resultados obtidos indicam uma tendência satisfatória para as umidades estudadas.

### 6.1.3 Escolha do material para utilizar no *liner*

O solo parece apresentar um comportamento mais adequado, do ponto de vista da escolha de um material a ser utilizado em uma camada impermeabilizante. Quando compactado na umidade ótima ou acima dela, este atende a exigência mínima quanto ao coeficiente de permeabilidade igual ou inferior a  $1e^{-7}$  cm/s estabelecida pela maioria dos órgãos reguladores.

Do ponto de vista da engenharia, o composto orgânico apresenta algumas desvantagens para ser utilizado em um sistema de impermeabilização. Na presença de fluxo, o excesso de composto é carregado, deixando maiores vazios na estrutura inicial do solo, o que poderia provocar futuros recalques e outros tipos de problemas associados à elevada deformabilidade do material.

O material após seco ao ar, apresenta problemas para se rehidratar, o que é indesejável do ponto de vista construtivo, pois a dificuldade de atingir a umidade desejada e de homogeneizar esta no material torna-se maior. A matéria orgânica, como foi antes mencionado, tende a formar grumos, que segundo diversos autores (Olsen, 1962; Houston e Randeni, 1992; Rowe *et al.*, 1995; Benson *et al.* 1999) são indesejáveis, pois na presença deles, a permeabilidade é maior.

A vantagem que a matéria orgânica possui, com relação ao emprego em *liners*, é a sua elevada capacidade de troca catiônica, o que eventualmente lhe permitiria reagir com alguns poluentes (metais pesados, por exemplo) e adsorvê-los, impedindo o seu avanço para as águas subterrâneas. As misturas em proporções menores de composto orgânico com solo do que as estudadas neste trabalho poderiam permitir o aproveitamento desta vantagem, se for comprovado que, em conjunto, ambos os materiais, cumprem os requerimentos construtivos quanto à permeabilidade, resistência e compressibilidade.

## 6.2 Sugestões

Sugere-se aperfeiçoar e analisar mais a fundo os ensaios de pisoteamento em laboratório, pois eles poderiam oferecer resultados mais realistas, desde que se assemelham mais com os mecanismos de compactação utilizados no campo durante a construção de numerosas obras geotécnicas, entre elas, o *liner* ou

camada impermeabilizante. Pesquisas deste tipo seriam um grande aporte, pois na literatura existe vasta informação dos ensaios Proctor e estáticos, e pouquíssima quanto à compactação por pisoteamento.

Recomenda-se dirigir a investigação do método do pisoteamento com o objetivo de tentar padronizar o ensaio e o equipamento utilizado.

Para melhor avaliar a influência dos diferentes métodos de compactação na permeabilidade de um determinado material, seria adequado realizar uma análise mais detalhada de um único solo. No presente estudo, foi realizada uma análise de quatro materiais distintos, onde fatores como a interação entre os componentes das misturas e propriedades intrínsecas de cada um deles, eventualmente, influenciaram seu comportamento durante os ensaios, portanto, não foi possível definir uma tendência ou padrão de comportamento.

Do ponto de vista do comportamento mecânico, poderia se avaliar a influência dos métodos de compactação na resistência de diversos materiais.

O estudo de materiais alternativos na construção de camadas impermeabilizantes deve ser uma atividade constante. Apesar de algumas desvantagens que o composto orgânico possui desde o ponto de vista mecânico e hidráulico da engenharia geotécnica, ele possui uma elevada capacidade de troca catiônica, podendo ser de grande utilidade na retenção de alguns contaminantes. Se nos aterros sanitários fosse feita uma seleção do lixo e os resíduos orgânicos fossem submetidos a processos de compostagem, o produto destes poderia ser aproveitado *in situ* como material de empréstimo com a função de adsorver poluentes. Talvez o uso de um composto orgânico em menores proporções que as estudadas neste trabalho, apresente um comportamento satisfatório quando misturado com outro material e seja suficiente para atenuar a contaminação do subsolo sem afetar as características de resistência, compressibilidade e permeabilidade do *liner*. A proporção deve ser tal que interaja em sua totalidade com o solo, pois como foi mencionado no capítulo de apresentação e discussão dos resultados, o excesso de matéria orgânica que fica livre é carregado com a presença de fluxo. Para isto, sugere-se executar ensaios similares aos do presente estudo, usando proporções menores de composto, e misturando-o com distintos tipos de solo.

Finalmente, sugere-se estudar a interação do composto com uma solução contaminante. Ensaio de batelada e de coluna com o composto orgânico misturado em baixas proporções (menos de 25%, para evitar os problemas ocorridos com a M2 e M3) com solo, podem ser feitos com o objetivo de avaliar a capacidade de retenção de alguns agentes poluentes.