

9. Conclusões e Sugestões

Neste capítulo, serão apresentadas as principais conclusões do trabalho, assim como recomendações para trabalhos futuros. Na organização das conclusões, procurou-se seguir a mesma ordem em que os assuntos apareceram na tese.

A análise dos recalques do aterro construído sobre um depósito de solos moles da Barra da Tijuca foi realizada a partir dos resultados de uma campanha de ensaios de laboratório, de uma campanha de ensaios de campo e dos registros do comportamento real do aterro (instrumentação).

Os resultados experimentais e dos registros foram apresentados nos capítulos 4, 5 e 6, respectivamente. Com base nestes resultados e registros, foi realizada no capítulo 7 uma análise pormenorizada dos principais aspectos que controlam o desenvolvimento dos recalques do aterro, que excederam 50 % da altura (4,5 m) do mesmo. Desta análise, um conjunto de parâmetros consistente foi determinado para os solos muito moles do depósito.

Este conjunto de parâmetros foi testado no capítulo 8 por meio de uma previsão numérica do comportamento da obra e se mostrou adequado para esta finalidade. Devido às características geomorfológicas da região (faixa litorânea da Baixada de Jacarepaguá) é possível adotar este conjunto de dados em obras com menos recursos. Contudo, devido ao tipo de ambiente de formação dos solos (marinho-flúvio-lagunar), o conjunto de dados deve ser adotado com cautela.

Apesar de ter-se concebido um programa experimental abrangente, este é apenas um estudo, que deve ser complementado com novas pesquisas. As sugestões para estas pesquisas concentrarão nos aspectos que deixaram abertas as principais conclusões da tese.

9.1. Conclusões

A importância de se adotar procedimentos especiais para preservação das condições *in-situ* de solos muito moles foi ressaltada para o caso em que a investigação geotécnica é realizada no laboratório. Neste caso, considera-se de especial importância o emprego dos procedimentos de moldagem de corpos de prova sugeridos Ladd e DeGroot (2003). Associa-se, à adoção destes procedimentos, o alto número de ensaios de boa qualidade e, assim sendo, os critérios de qualidade propostos com base na curva de compressão de solos no laboratório devem se referir à qualidade de corpos de prova e não à qualidade de amostras, como habitualmente é feito.

Uma análise comparativa mostrou que existe uma boa concordância na classificação de solos muito moles quando esta é realizada levando-se em consideração o comportamento do solo durante a penetração do cone (campo) ou com base na distribuição granulométrica dos grãos e limites de plasticidade dos solos (laboratório). Contudo, por permitirem a identificação de delgadas lentes drenantes, assim como por captarem o comportamento do solo *in-situ*, os ensaios de piezocone se mostram de maior interesse para se determinar a estratigrafia de um depósito de solos muito moles. O método de classificação dos solos de Robertson (1990) se mostrou adequado para classificação de solos como os da Barra da Tijuca, que apresentam baixo peso específico. Atualizações desse método, conforme propostas por Robertson (2009), não devem ser utilizadas livremente neste tipo de solo.

A ocorrência de dois horizontes, provavelmente formado em épocas geológicas diferentes, foi verificada no depósito de solos muito moles. Os solos do horizonte superior (até cerca de 5 m de profundidade) foram provavelmente formados em um período posterior a um descarregamento dos solos do horizonte inferior. As características que controlam o comportamento dos solos de ambos os horizontes devem ser determinadas separadamente, pois apresentaram significativas diferenças. Diversos aspectos (deformabilidade, permeabilidade e resistência) corroboram a divisão do depósito em dois horizontes.

O solo do horizonte superior (até cerca de 5 m de profundidade) é aproximadamente isotrópico e caracterizado por baixas tensões efetivas. A parcela de sobre-adensamento do mesmo, caracterizada por $OCR \approx 1,3$, pode ser associada ao mecanismo da compressão secundária (envelhecimento), contudo, pelo fato de o nível de tensões *in-situ* ser muito baixo, tem pouco significado prático e pode se desprezada.

O solo do horizonte inferior também é caracterizado por baixas tensões efetivas, contudo o sobre-adensamento do mesmo é caracterizado pela diferença $\sigma'_p - \sigma'_{v0} \approx 25$ kPa, que é aproximadamente constante com a profundidade. A tensão de pré-adensamento pode ser associada, principalmente, ao mecanismo da sobrecarga, responsável pela leve anisotropia observada. Com base nas informações que se tem, associa-se essa tensão de sobre adensamento à passagem de dunas pela região.

A resistência não drenada de solos muito moles é geralmente relacionada a resistência líquida de ponta do cone pelo fator N_{kt} ou N_c . Determinações teóricas indicaram, para o solo do horizonte inferior, N_c igual a 8,9, que é aproximadamente igual ao N_{kt} , obtido por correlações com os resultados de ensaios de palheta. Para o solo do horizonte superior, o ajuste das curvas de cone com as resistências de palheta indicaram valores tão baixos quanto 2 para N_{kt} . Contudo evidências mostram que estes valores podem ser um pouco mais elevados (superiores a 4).

Os resultados de ensaios de palheta e piezocone mostram que a razão de sobre adensamento dos solos do horizonte inferior se relacionam com a razão de resistência pela relação $OCR = 1,75 (S_u/\sigma'_{v0})^{1,09}$ (relativa à figura 7.7).

As curvas de compressão resultantes de ensaios incrementais ou de deformação constante (CRS) possuem formas semelhantes e, assim sendo, a quantificação de recalques primários pode ser realizada igualmente a partir de parâmetros obtidos de qualquer uma delas. Valores do parâmetro $C_\epsilon/(1+e)$ variam entre 0,5 e 0,6 (figura 7.15) e evidenciam a alta deformabilidade dos solos.

O amolgamento do solo tem como efeito uma superestimativa dos recalques até um nível de tensões (σ'_t) de 10 a 15 vezes a tensão de pré-adensamento (σ'_p)

do solo. A partir de (σ'_t) , a estimativa de recalques não é influenciada pelo amolgamento. Quanto maior o valor de σ'_p , piores serão as estimativas de recalque com base em resultados de ensaios de laboratório realizados com solos amolgados. A estimativa de recalques, a partir de curvas (e vs $\log \sigma'_v$) de ensaios em que a relação C_c/C_r é menor ou igual a 10, deve ser feita com cuidado, pois este resultado indica o amolgamento de corpos de prova.

A parcela da compressão secundária é relevante para os solos do depósito. O potencial da relação $C_\alpha/C_c = \text{constante}$ (Mesri e Godlewisk, 1977) para representar o comportamento do solo é reconhecido, contudo a avaliação dos parâmetros deve ser realizada criteriosamente. Os altos valores obtidos (até $C_\alpha/C_c = 0,1$) comprovam a importância da parcela dos recalques associadas à compressão secundária. Este valor é superior ao valor apresentado pela maioria dos solos que se tem registro. As compressões secundárias finais de um depósito de solos moles sob carregamento correspondem a até 8,5 % da espessura da camada destes solos (equação 7.5 e tabela 7.10).

C_α/C_c dos solos no estado amolgado se manteve constante e com valores da mesma ordem de grandeza que os solos obtidos para os solos no estado indeformados. Este fato indica que o amolgamento não altera a relação C_α/C_c , mas que C_α aumenta e reduz para tensões anteriores e posteriores a σ'_p .

O coeficiente de permeabilidade dos solos do depósito reduz continuamente com o aumento das tensões efetivas e, conseqüente, redução dos índices de vazios. Para a condição de campo, a anisotropia de permeabilidade não é marcante ($0,8 < r_k < 1,2$), contudo pode ser acentuada ao se carregar o solo (figura 7.24). Os valores mais baixos e altos se referem à anisotropia dos solos do horizonte superior e inferior, respectivamente. O amolgamento provoca a redução do coeficiente de permeabilidade dos solos na condição indeformada e esta redução pode chegar a um fator de 20.

A redução contínua do coeficiente de permeabilidade dos solos em estudo, sob grandes variações de tensões (ex.: na recompressão e na compressão virgem) é bem representada por relações com o volume específico [$v = (1+e)$] do mesmo,

de acordo com a expressão $k = [1/a (1+e)]^{1/b}$. Contudo, para fins práticos, este tipo de relação não se mostra de interesse.

Por outro lado, uma relação linear e vs $\log k$, proposta por Taylor (1948), mostrou-se razoavelmente satisfatória para representar o comportamento do solo para níveis de tensões superiores a σ'_p . Isto indica que o comportamento do solo pode ser descrito a partir do conhecimento do coeficiente de variação C_k e da permeabilidade para um índice de vazios específico (habitualmente condição inicial).

Para resolução de problemas práticos, C_k pode ser estimado como (1) $C_k = (0,25 \text{ a } 0,40) e_0$, sendo que os valores mais baixos e mais elevados se referem a solos com as características dos solos dos horizontes superior e inferior, respectivamente, e (2) $C_k = 0,5 C_c$, para os solos de ambos os horizontes.

Determinações indiretas (ensaio incremental) são normalmente consideradas inadequadas para obtenção do coeficiente de permeabilidade do solo, contudo o mesmo não é verdadeiro para a obtenção de C_k . Quando a permeabilidade dos solos, para um índice de vazios específico, é determinada partir de ensaios de campo, valores de k se mostraram até cerca de dez vezes superiores àqueles determinados no laboratório (tabela 7.12). Contudo, estes valores podem estar refletindo a variabilidade dos solos do depósito ou mesmo dificuldades em caracterizar os solos na condição de campo.

A variação do coeficiente de adensamento do solo acompanha as variações dos coeficientes de permeabilidade e de compressão volumétrica do mesmo. Neste caso, uma redução brusca (até dez vezes) no valor de c_v é observada próxima à tensão de pré-adensamento. Anterior e posteriormente a esta tensão, os valores do coeficiente de adensamento são aproximadamente constantes. A queda brusca é um indício da boa qualidade dos corpos de prova.

O coeficiente de adensamento dos solos amolgado é da mesma ordem de grandeza do coeficiente de adensamento do solo indeformado no tramo normalmente adensado e por isso é desejável que não ocorram amolgamentos no campo.

O amolgamento do solo é inevitável durante cravação de drenos aceleradores de recalques. Neste caso, os parâmetros dos solos do cilindro amolgado provavelmente controlam o comportamento de campo. Na avaliação da resistência ao fluxo de drenos, os parâmetros dos solos amolgados devem ser levados em consideração (equação 7.11). A área amolgada ao redor do dreno pode ser avaliada com base na solução da penetração do cone (Teh, 1987), ou seja, o raio fictício amolgado é proporcional a $\sqrt[4]{I_r} * r_m$ (item 7.6).

Camadas mais próximas a superfícies drenantes adensam mais rapidamente e, portanto, a redução brusca no valor de c_v ocorre mais rapidamente e, assim sendo, os horizontes mais superficiais acabam controlando o processo de adensamento do depósito. Com base neste aspecto, recomenda-se a utilização de métodos numéricos na resolução de problemas de adensamento, por mais simples que pareçam.

Uma prática recomendável ao se desenvolver projetos de aterro sobre solos moles, no qual a sobrecarga ultrapasse a tensão de pré-adensamento dos solos, é prever, antes que σ'_p seja ultrapassada, um intervalo de tempo entre etapas de carregamentos.

Ao se aplicar o método de Asaoka (1978) para se retro-analisar os dados de recalque e assim definir c_h com base no comportamento de campo, verificou-se que as simplificações são tantas que os resultados obtidos podem se tornar menos capazes de representar o comportamento do solo do que se os parâmetros tivessem sido obtidos a partir de ensaios de campo ou laboratório.

As incertezas envolvidas em todos os métodos de determinação de c_v ou c_h e a variação aleatória dos valores obtidos pelos diversos métodos, indicam que determinações realizadas a partir de ensaios de campo (dissipação em piezocone), no laboratório (interpretação pelo método de Taylor), com base nos registros dos recalques do depósito e conjuntas (m_v de laboratório e k de campo) são igualmente adequadas.

O resultado obtido na simulação numérica superestimou o recalque, contudo dentro de uma ordem de grandeza razoável (erro de até 20 %) para o tipo de solo. As formas das curvas de recalques ocorridos no campo e previstos concordaram

razoavelmente bem. Outros aspectos do comportamento da obra foram simulados com uma pior aproximação.

9.2. Sugestões

Ao tecer algumas conclusões no trabalho, esbarrou-se, algumas vezes, na falta de dados conclusivos. Assim sendo, as sugestões para trabalhos futuros compreendem principalmente estudos pelos quais tais dados conclusivos podem ser obtidos. As sugestões serão apresentadas na forma de uma lista.

- Datação dos solos do depósito;
- Ensaio para determinação dos argilo-minerais constituintes dos solos;
- Ensaio de permeabilidade no laboratório;
- Ensaio de adensamento convencional na condição de fim do primário;
- Ensaio de longa duração para avaliação da fluência – neste caso, vale a pena moldar corpos de prova em direções transversais;
- Ensaio de adensamento do tipo CRS, com diversas velocidades para corpos de prova moldados de um mesmo tipo de solo (mesma amostra);
- Determinação dos parâmetros dos solos por meio de retro-análises sofisticadas;