1. Introdução

1.1. Motivação

Regiões com a presença de depósitos de solos moles são, ou pelos altos custos de implantação da infra-estrutura indispensável ou pelas dificuldades técnicas envolvidas nas construções e respectivos projetos geotécnicos, locais particularmente inapropriados para a evolução de grandes centros populacionais e/ou industriais. Esta afirmação pode ser comprovada ao se analisar a organização natural das ocupações pretéritas, que geralmente ocorriam em regiões nas quais as condições geotécnicas locais eram mais favoráveis.

Contudo, tem-se verificado nas últimas décadas um aumento da densidade populacional dessas regiões que, a princípio, eram consideradas inadequadas à ocupação, como é o caso de partes da Barra da Tijuca e do Recreio dos Bandeirantes (Baixada de Jacarepaguá). Em parte, tal aumento pode ser explicado pela crescente escassez de locais adequados, no que se refere às características geológico-geotécnicas dos solos locais, e, conseqüentemente, na especulação imobiliária. Por outro lado, grandes conglomerados populacionais e centros turísticos usualmente localizam-se próximos a regiões costeiras ou nas imediações de leitos de rios, onde frequentemente ocorrem importantes depósitos de solos moles.

As dificuldades técnicas envolvidas em projetos e construções sobre solos moles e o crescente aumento populacional de áreas, como a da Baixada de Jacarepaguá, constituída parcialmente por depósitos deste tipo de solo, já seriam motivos suficientes para se interessar por um tema que aborde o assunto: solos moles. Contudo ainda existem outras razões que justificam o interesse.

A experiência adquirida ao longo do tempo a respeito dos solos moles da Baixada de Jacarepaguá permite dizer que estes, no contexto de solos naturais

mundiais, pertencem a um grupo peculiar, que apresenta características de compressibilidade, permeabilidade e resistência extremamente ruins e, por isso, são classificados como solos muito moles. Estas características inviabilizam, em muitos casos, a construção de simples aterros sem o emprego de técnicas especiais, que oneram a construção e dificultam ainda mais as análises necessárias ao desenvolvimento de projetos. Ressaltam-se também as dificuldades extras relativas à caracterização de solos tão moles em laboratório, a qual depende da obtenção de amostras indeformadas. Assim sendo, o assunto, solos muito moles, além de atual, é bastante desafiador.

A oportunidade de dar uma pequena contribuição em um tema desafiador e, neste contexto, trabalhar ainda com solos tão exclusivos, desperta o interesse de qualquer geotécnico.

1.2. Objetivos

Os objetivos centrais desta tese consistem em avaliar o comportamento, no que se refere a recalques, dos solos muito moles de um depósito da Barra da Tijuca, sob carregamento, e averiguar minuciosamente as características que controlam o comportamento destes solos.

Será realizada uma análise pormenorizada dos recalques de um aterro construído sobre esse depósito e, neste contexto, avaliados os mais importantes aspectos que governam a evolução e magnitude dos recalques e os métodos usualmente adotados na análise dos mesmos.

Uma comparação entre o comportamento real de um aterro instrumentado construído sobre um depósito de solos muito moles e o resultado de uma previsão numérica deste problema, na qual foram adotados como dados de entrada os resultados de ensaios de laboratório, realizados com corpos de prova de excelente qualidade, e de ensaios de campo, também faz parte do objetivo da tese.

Além desses, que são considerados os objetivos principais, pretende-se, com base no comportamento dos solos muito moles da Barra da Tijuca:

- Avaliar o potencial de métodos normalmente adotados para interpretação de resultados de ensaios de laboratório;
- Reafirmar a importância de se obter corpos de prova de boa qualidade para realização de ensaios no laboratório, detalhar alguns procedimentos adotados para obtenção dos mesmos e discorrer a respeito das propostas atualmente empregadas para avaliação da qualidade destes corpos de prova;
- Propor a atualização de correlações empíricas para se estimar parâmetros, que caracterizam o comportamento do solo, com base em resultados de ensaios de campo e laboratório;
- Fazer considerações quanto aos métodos construtivos adotados para alteamento do aterro e a forma de considerar os efeitos dos mesmos nas análises;
- Fazer considerações de projeto no que se refere à caracterização do depósito de solos e à modelagem geotécnica de obras com disponibilidade reduzida de recursos;
- Explicitar a dificuldade em se aplicar métodos simplificados na previsão de recalques ocorridos no campo.

1.3. Metodologia

Partindo do conhecimento das potencialidades e limitações dos métodos de investigação geotécnica, definiu-se, com o propósito de atingir o objetivo da tese, uma seqüência de procedimentos e técnicas de investigação e análise que foram adotados no desenvolvimento da mesma. Esta seqüência está descrita e justificada a seguir.

A avaliação de recalques de aterros sobre solos muito moles requer o conhecimento das características de deformação e permeabilidade, dos solos de fundação, ao longo do tempo. Geralmente, essas características são obtidas no laboratório a partir dos resultados de ensaios oedométricos, que são realizados com corpos de prova moldados de amostras *indeformadas*. Assim sendo, foram coletadas amostras *indeformadas* no campo e foi executada uma campanha

experimental de laboratório, que consistiu na realização de ensaios de adensamento convencionais e especiais.

Contudo, nem sempre é possível obter amostras *indeformadas* em solos muito moles, mesmo adotando-se procedimentos especiais de coleta no campo. No laboratório, a moldagem dos corpos de prova também requer a adoção de procedimentos especiais para se evitar o amolgamento dos solos. Neste trabalho, em todas as etapas, desde a coleta da amostra no campo até a moldagem dos corpos de prova no laboratório, foram adotados procedimentos especiais para obtenção de corpos de prova de boa qualidade e, conseqüentemente, uma caracterização *isenta* da influência do amolgamento.

A partir da caracterização de solos muito moles no laboratório, obtêm-se geralmente resultados diferentes daqueles provenientes de uma caracterização realizada no campo. Devido ao reconhecimento destas diferenças, mas também de algumas vantagens (ex.: medidas quase contínuas) que os métodos de campo têm sobre os métodos de laboratório e do grande avanço, experimental e analítico, observado nas últimas décadas, de métodos de investigação de campo, julgou-se necessário executar uma campanha experimental *in-situ*. Esta campanha consistiu na realização de ensaios de piezocone, de dissipação em piezocone, de permeabilidade em piezômetros e de palheta.

Diferenças existentes entre resultados experimentais de campo e laboratório, que conduzem a incertezas em resultados de análises, não tem sido, porém, o principal alvo de preocupações. Isto é devido ao fato de que a ocorrência de recalques no campo se mostra a uma velocidade superior do que quando prevista com base nos parâmetros obtidos experimentalmente.

Assim sendo, no que se refere às propriedades de adensamento (fluxo e compressão), retro-analisar o comportamento real de campo passa a constituir uma tarefa fundamental na caracterização de solos muito moles. Dentro deste contexto, o aterro construído sobre o depósito de solos moles foi instrumentado e esta instrumentação foi acompanhada desde o início das obras até um período posterior às mesmas. Foram instalados piezômetros, medidores de deslocamentos (horizontais e verticais) e medidores de nível d'água.

Muito embora os registros gerados a partir da instrumentação possibilitassem o desenvolvimento de uma sofisticada retro-análise do problema, no escopo desta tese, apenas uma retro-análise simplista dos dados de recalque e uma análise comparativa dos resultados de uma previsão do comportamento da obra, adotando-se parâmetros experimentais para os solos, com os registros provenientes da instrumentação foram realizadas.

É reconhecido, contudo, que, para realização de previsões (ou retro-análises) do comportamento de campo, uma série de suposições é requerida e, como efeito, têm-se incertezas associadas a essas previsões. Neste contexto, o bom entendimento dos resultados experimentais e de como estes devem ser aplicados na resolução de problemas conduzem a estimativas de maior confiança. Foi realizada então uma análise minuciosa dos resultados experimentais e dos métodos de obtenção destes resultados, além de ensaios de laboratório (triaxiais) complementares.

Quanto aos métodos de previsão de recalques, os simplificados, por um lado, podem ser aplicados apenas em casos particulares (simples), no que se refere à geometria do problema, às condições de contorno e drenagem e à estratigrafia e ao comportamento do solo. Por outro lado, métodos de previsão mais complexos requerem o conhecimento de parâmetros dos solos e das condições do subsolo que na maior parte das vezes não são conhecidos. Neste trabalho, os resultados das investigações experimentais possibilitaram a realização da análise dos recalques por meio de uma ferramenta numérica (método dos elementos finitos), que permitia a representação, a princípio, razoável para o comportamento dos solos e as condições do problema.

Resumindo, para entendimento do comportamento dos solos muito moles do depósito da Barra da Tijuca, instrumentou-se uma obra e registraram-se todos os aspectos comportamentais de interesse desta, durante e após o período de construção e realizaram-se campanhas de ensaios campo, durante a qual foram coletadas amostras *indeformadas* dos solos do depósito, e de ensaios de laboratório, com corpos de prova considerados de boa qualidade, e uma retro-análise dos registros de recalque. Com base nos resultados das investigações e nos

dados obtidos a partir da instrumentação, utilizou-se uma ferramenta numérica para a previsão do comportamento da obra.

1.4. Estrutura

Esta tese, levando-se em consideração o objetivo e a metodologia para desenvolvimento da mesma, está organizada em 9 capítulos. Uma descrição dos assuntos abordados em cada capítulo encontra-se a seguir.

Neste capítulo introdutório, foi abordada inicialmente a relevância da tese dentro dos cenários brasileiro e mundial, fator que motivou o desenvolvimento da mesma. Foram definidos os objetivos principais e secundários, assim como também foi definida uma metodologia de abordagem do tema. Neste item, está sendo descrita a forma de apresentação da tese. No item seguinte, será ressaltado o tipo de análise que está fora do escopo da tese.

No segundo capítulo, será feita uma revisão bibliográfica limitada à contextualização dos tópicos abordados no capítulo 7, assim como a descrição sucinta de alguns dos procedimentos, técnicas e métodos empregados para análises destes tópicos.

No terceiro capítulo, será feita uma descrição da Baixada de Jacarepaguá e da região dentro da baixada em que está inserida a obra instrumentada. Detalhes do projeto, no que se refere às características do aterro e da fundação do mesmo, serão descritos no capítulo, assim como detalhes do projeto de instrumentação geotécnica, dos procedimentos de coleta das amostras indeformadas e da campanha de ensaios de campo.

No quarto capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios laboratório, assim como as técnicas e os procedimentos adotados durante a realização dos mesmos. Serão abordadas e discutidas todas as questões relevantes na preparação dos corpos de prova e, com base nos resultados dos ensaios, que serão analisados no capítulo 7, apresentada uma avaliação da qualidade dos corpos de prova.

No quinto capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios de campo, assim como as características dos equipamentos utilizados e os procedimentos adotados na campanha. Sob esta perspectiva, serão abordados e discutidos os

aspectos relevantes na caracterização de solos muito moles. Uma análise direta dos resultados também será realizada, contudo as interpretações dos mesmos é assunto do capítulo 7.

No sexto capítulo, serão apresentados os registros gerados, ao longo do tempo, a partir dos instrumentos instalados na obra, assim como será feita uma breve descrição dos instrumentos e de como são realizadas as leituras (registros). Será feita uma avaliação direta dos resultados. Aspectos relevantes para o desenvolvimento de projeto de instrumentação de aterros construídos sobre depósitos de solos muito moles serão analisados.

No sétimo capítulo, os resultados experimentais e os dados do comportamento real da obra serão interpretados e analisados conjuntamente. Uma aprofundada discussão no que tange os métodos de análise dos resultados dos ensaios e dos registros provenientes da instrumentação, as considerações para determinação de parâmetros geotécnicos dos solos e o emprego destes parâmetros em análises de recalques será realizada. Um conjunto consistente de parâmetros dos solos muito moles será definido.

No oitavo capítulo, será feita a previsão do comportamento do aterro a partir de uma análise de elementos finitos. O resultado da previsão, que será obtido com base no consistente conjunto de parâmetros determinados no capítulo 7, será comparado com os dados provenientes da instrumentação geotécnica.

No nono capítulo, serão organizadas e resumidas as principais conclusões do trabalho. Serão feitas também sugestões para trabalhos futuros.

1.5. Fora do Escopo

Avaliações dos aspectos que se relacionam com a estabilidade do aterro construído sobre o depósito de solos muito moles da Barra da Tijuca não fazem parte do escopo desta tese. Contudo, são reconhecidas (consultar Ladd, 1991) as dificuldades e importância destas avaliações, que isoladamente podem ser objeto de outra tese.

Muito embora este tipo de avaliação não seja abordado, é importante definir em que condições de estabilidade o aterro foi alteado, pois a ocorrência de rupturas, por causar o amolgamento do solo, mudaria a condição da análise dos recalques. Para fins de projeto, a estabilidade foi analisada e o resultado da mesma mostrou que o aterro foi construído com fator de segurança mínimo igual a 1,2.