

# 1 Introdução

Historicamente é sabido que muitas das rupturas ocorridas em barragens ou taludes naturais podem ser atribuídas ao fenômeno da liquefação de solos arenosos, causada pela ação de carregamentos dinâmicos gerados por explosão ou, mais freqüentemente, por terremotos.

Quando liquefação ocorre, um súbito aumento da poropressão faz decrescer a resistência ao cisalhamento do solo e sua habilidade em suportar edifícios é significativamente reduzida, como mostra a figura 1.1 por ocasião do terremoto de Niigata, Japão, em 1964. Solo liquefeito também pode exercer altas pressões sobre estruturas de contenção, causando inclinações da mesma e movimentos do solo que, por sua vez, originam recalques e destruição de estruturas localizadas sobre a superfície do terreno, como ocorrido junto à ponte Great Hanshin Bridge, USA (figura 1.2).



Figura 1.1 Liquefação do solo de fundação em Niigata, Japão, 1964, causando colapso do conjunto habitacional Kawagishi-cho (Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA).



Figura 1.2 Recalque do terreno por liquefação junto a uma estrutura de contenção da Great Hanshin Bridge. (Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. USA).

O aumento súbito da poropressão pode também provocar deslizamentos de encostas e taludes de barragens, como durante o terremoto de San Fernando, em 1971, na barragem Lower San Fernando Dam (figura 1.3).

O termo liquefação tem sido empregado para descrever fenômenos relacionados, que produzem efeitos similares, mas cujos mecanismos de formação são diferentes, conforme será discutido em detalhes no capítulo 2. Estes fenômenos são modernamente descritos como fluxo por liquefação e mobilidade cíclica.

Fluxo por liquefação é o fenômeno no qual o equilíbrio estático é destruído por carregamentos estáticos ou dinâmicos em um depósito de solo com baixa resistência residual (resistência do solo liquefeito). Colapsos causados por fluxo por liquefação são frequentemente caracterizados por movimentos rápidos e de grande extensão semelhantes aos experimentados pelo conjunto de edifícios da figura 1.1 cujo solo de fundação sofreu uma notável perda de capacidade de carga durante o terremoto de Niigata, Japão, em 1964.



Figura 1.3 Deslizamento na barragem Lower San Fernando, em 1971 (Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA).

Mobilidade cíclica, por outro lado, é um fenômeno causado por carregamentos cíclicos, ocorrendo em depósitos de solo sob tensões cisalhantes estáticas inferiores à resistência ao cisalhamento do material, com as deformações desenvolvendo-se gradualmente. Um dos efeitos comumente observado é o escorregamento lateral (*lateral spreadings*) em maciços de solo planos ou pouco inclinados juntos a rios e lagos, como os casos ilustrados nas figuras 1.4 e 1.5.



Figura 1.4 Escorregamentos laterais (*lateral spreading*) ao longo do rio Motagua, Guatemala, durante terremoto em 1976, notando-se fraturas paralelas ao rio. (Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA).



Figura 1.5 Escorregamentos laterais (*lateral spreading*) ao redor do lago Merced, 1957 (Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA).

Altos valores de poropressão podem também causar um rápido fluxo de água para a superfície do terreno, durante e após o terremoto, transportando partículas de areia através de fissuras existentes ou produzidas no maciço, que são depositadas sob a forma de pequenas erupções de areia (*sand boils*), conforme mostram as figuras 1.6 e 1.7.



Figura 1.6 Ocorrência de erupções de areia (*sand boils*) na rodovia 98 durante o terremoto de El Centro, 1979 (Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA).



Figura 1.7 Ocorrência de erupções de areia (*sand boils*) durante o terremoto de Loma Prieta (Santa Cruz, California) em 1979. (United States Geological Survey).

A literatura registra várias evidências do fenômeno de fluxo por liquefação causado por carregamentos estáticos ou monotônicos em barragens de rejeitos (Kleiner, 1976; Jennings, 1979) e aterros hidráulicos (Cornforth et al., 1975; Mitchell, 1984), etc. No Brasil, também existem evidências de rupturas em barragens de rejeito que sugerem como causa provável o fluxo por liquefação, de acordo com Tibana (1997), nos acidentes das barragens de rejeito das minas de Fernandinho (Parra e Pereira, 1987) e do Pico de São Luiz (Parra e Ramos, 1987).

A execução de barragens de rejeito usando a técnica de construção à montante pode levar à ocorrência da ruptura por liquefação estática (chamada também de liquefação monotônica) se a velocidade de construção for suficientemente alta para causar o desenvolvimento de excessos de poropressão no material de rejeito. A suscetibilidade à liquefação é geralmente determinada em ensaios triaxiais não drenados sob deformação controlada. A resposta de liquefação pode ser observada em amostras de solo fofo quando as tensões de cisalhamento atingem um pico seguido por uma fase de amolecimento aparente que, no caso de carregamento não drenado, é associado com a tendência do material em contrair de volume e, assim, aumentar o valor da poropressão. Para alguns estados iniciais, a parte descendente da resposta do material pode ser seguida por uma fase crescente que se atenua à medida que o estado permanente ou crítico for atingido.

A análise da liquefação estática depende de uma previsão adequada da resposta não drenada de materiais fofos. Estudos experimentais foram publicados por décadas na literatura e vários modelos constitutivos para materiais granulares foram também apresentados com base em sofisticadas formulações elasto-plásticas (Ishihara, 1993; Lade e Yamamuro, 1999; Nova e Wood, 1979; Drescher e Mroz, 1997; Boukpeti e Drescher, 2000; Boukpeti, Mroz e Drescher, 2000; etc.).

Nesta dissertação, a modelagem da resposta de liquefação por carregamento estático, representada pela previsão da trajetória das tensões efetivas no plano  $p' : q$ , foi feita considerando-se modelos mais simples propostos na literatura por Juárez-Badillo (1999b) e Gutierrez e Verdugo (1995). Este último, principalmente após modificação introduzida pela dependência de alguns parâmetros em relação à tensão de confinamento de forma semelhante ao modelo hiperbólico (Duncan et al, 1980), levou a resultados bastante satisfatórios nas retroanálises consideradas, apesar da relativa simplicidade da formulação.

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos e apêndices. No capítulo 2 são estudados os fenômenos do fluxo por liquefação e liquefação cíclica, discutidos os critérios de suscetibilidade à liquefação bem como apresentados conceitos sobre a resistência não drenada de solos liquefeitos e sobre a iniciação do processo de liquefação.

No capítulo 3 descreve-se o modelo de Juárez-Badillo (1999b) com apresentação da formulação e um exemplo de retroanálise de ensaios em areia.

O capítulo 4 descreve o modelo constitutivo de Gutierrez e Verdugo (1995), discutindo através de um exemplo as diferenças entre a proposta original e a versão modificada no curso desta dissertação.

O capítulo 5 apresenta os resultados de previsão de alguns ensaios triaxiais não drenados com auxílio dos modelos constitutivos de Juárez-Badillo (1999b) e Gutierrez e Verdugo (1995), nas suas versões original e modificada, enquanto o capítulo 6 informa as principais conclusões do trabalho e apresenta sugestões para futuras pesquisas na área de liquefação de solos.

Os três apêndices finais contêm gráficos para auxiliar na interpretação dos resultados dos ensaios de laboratório, bem como um estudo da sensibilidade dos parâmetros dos modelos constitutivos tratados nos capítulos 3 e 4 e, finalmente, um diagrama de blocos detalhando a implementação do modelo de Gutierrez e Verdugo Modificado.