

# 1 Introdução

## 1.1.Motivação e objetivos

Os danos observados em geo-estruturas devido à ação de carregamentos dinâmicos gerados por terremotos não ocorrem necessariamente durante o evento. Têm sido observado em campo que muitos danos acontecem após o término da excitação. Entre os fatores que contribuem para este comportamento, podem ser mencionadas a geração e posterior redistribuição dos excessos de poropressão, a ação de fenômenos erosivos (*piping*) em fissuras criadas pelo sismo e, principalmente, a perda de resistência do solo sob ação do carregamento dinâmico. Em geo-estruturas localizadas em zonas de atividade sísmica, a consideração de análises pós-sismo, como a estabilidade dos taludes de barragens, são considerações importantes de projeto.

Um exemplo representativo de colapso pós-sismo é a conhecida ruptura da barragem de Lower San Fernando, em 1971, localizada no sul da Califórnia e responsável na época por 80% do abastecimento d'água da cidade de Los Angeles, cuja crista foi rebaixada em aproximadamente 9 metros devido ao deslizamento do talude da face de montante (Figura 1.1 e Figura 1.2). De acordo com Duncan e Wright (2005) o fator de segurança calculado com a resistência não-drenada, imediatamente após o sismo, foi igual a 1,4 enquanto que após o terremoto, considerando-se a redistribuição das poropressões e a existência de drenagem parcial, esse valor decaiu para apenas 0,8.



Figura 1.1 - Deslizamento na barragem de San Fernando, em 1971 (EERC, University of California, Berkeley, USA).

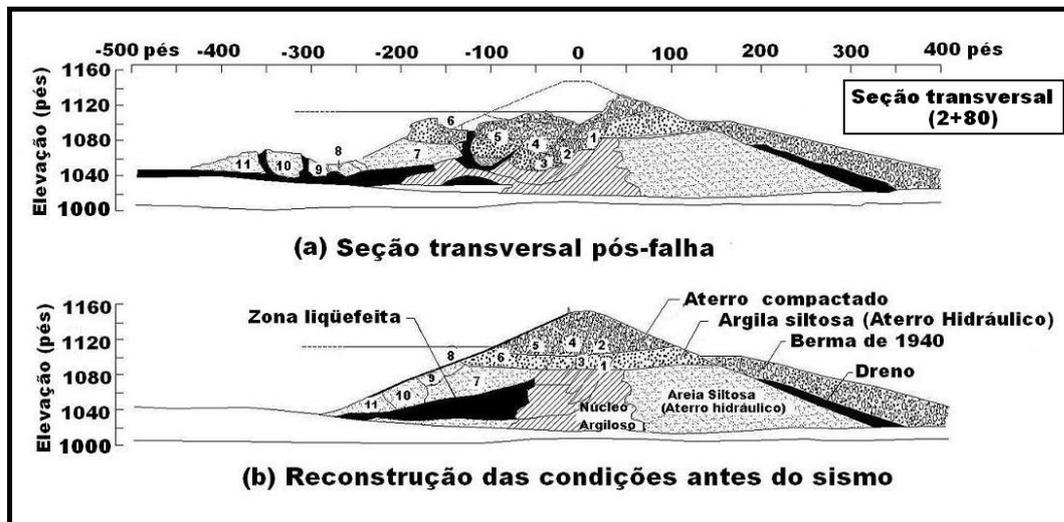


Figura 1.2 - Ruptura e reconstrução das condições iniciais da barragem de San Fernando. Modificado de Seed *et. al.* (1988)

Uma vez que terremotos são eventos de curta duração, é razoável assumir, exceto possivelmente, para pedregulhos e enrocamentos, que a resistência ao cisalhamento não-drenada deve ser usada para análises de estabilidade executadas durante e imediatamente após o sismo.

Para análises durante o sismo, Makidisi e Seed (1977) recomendaram que para solos argilosos, solos granulares secos ou parcialmente saturados bem como para solos granulares densos saturados, onde não se espera significativa perda de resistência devido ao fenômeno da liquefação, a utilização de 80% da resistência não-drenada estática como o valor da resistência não-drenada do solo sob

condição dinâmica. Aqueles pesquisadores observaram em ensaios de laboratório um comportamento predominantemente elástico nas amostras de solo, quando submetidas a um grande número de ciclos (superior a 100 ciclos) de até 80% da resistência não-drenada estática. Deformações permanentes substanciais foram constatadas para carregamentos cíclicos próximos do valor total da resistência não-drenada estática. Outros pesquisadores (Hynes-Griffin e Franklin, 1984; Kavazanjian et al., 1997) também sugeriram uma redução de 20% do valor da resistência ao cisalhamento estática, não-drenada, para utilização nos métodos de cálculo de estabilidade pseudo-estáticos. Duncan e Wright (2005) consideram que esta redução pode ser ignorada para materiais não propensos à liquefação devido aos efeitos da velocidade de aplicação do carregamento sísmico. A maioria dos solos sujeita a rápidos carregamentos cíclicos exibe uma resistência não-drenada de 20% a 50% superior àquela determinada em ensaios estáticos convencionais de laboratório, onde o tempo para atingir a ruptura pode ser de vários ou muitos minutos. O aumento da resistência devido à velocidade de aplicação do carregamento dinâmico poderia então contrabalançar a redução proposta por Makidisi e Seed (1977) para estimativa da resistência dinâmica de solos argilosos, solos granulares secos ou parcialmente saturados e para solos granulares densos saturados.

Em estudos de estabilidade pós-sismo, usualmente se consideram para solos não-suscetíveis à liquefação o valor da resistência não-drenada estática e os excessos de poropressão gerados pela excitação para análises de curto prazo (imediatamente após o sismo). Nas análises de longo prazo, adota-se o valor da resistência drenada residual, considerando-se a dissipação dos excessos de poropressão, em um procedimento semelhante ao aplicado no caso da estabilidade de taludes de montante em barragens de terra devido ao rebaixamento rápido do nível do reservatório.

Quanto à estimativa e distribuição dos valores dos excessos de poropressão gerados pela excitação sísmica, é necessária a simulação computacional do evento, com um modelo que considere relações constitutivas formuladas em termos de tensões efetivas e que seja capaz de bem representar a ocorrência de deformações cisalhantes e volumétricas dos solos, incluindo-se a possibilidade do desenvolvimento de liquefação dinâmica.

O modelo linear equivalente, frequentemente utilizado em análises dinâmicas de maciços de solo, aqui se revela impróprio de ser adotado visto sua formulação ser baseada em termos de tensões totais. Modelos elastoplásticos complexos em termos de tensões efetivas, como os modelos de plasticidade múltipla (Prevost, 1985), de plasticidade generalizada (Pastor et. al., 1990) e o modelo UBCSAND (Byrne *et al.*, 2003), dentre outros, também não foram considerados, optando-se nesta pesquisa pela aplicação de modelos não-lineares cíclicos (Martin et. al., 1975; Finn et al., 1977; Byrne, 1991) onde a rigidez do solo depende não apenas da amplitude das deformações cisalhantes, como no caso do modelo linear equivalente, mas também da história de tensões, o que então permite prever a geração, redistribuição e eventual dissipação de poropressões durante e após o carregamento sísmico.

Nessa dissertação, que trata da investigação do comportamento pós-sismo de uma barragem de rejeitos de mineração situada na Argentina, a simulação numérica da resposta dinâmica da estrutura foi analisada com auxílio do programa computacional FLAC v.5. Trata-se de um dos simuladores computacionais mais completos (embora também complexo quanto ao entendimento de toda a sua potencialidade de aplicação) dentre os atualmente disponíveis para análises de problemas geotécnicos sob ação de carregamentos dinâmicos. Uma descrição dos procedimentos numéricos, das dificuldades, vantagens e limitações na utilização do programa FLAC serão abordadas no decorrer deste trabalho.

## **1.2. Estrutura da dissertação**

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, incluindo essa introdução como capítulo 1, referências bibliográficas, um apêndice e um anexo.

O capítulo 2 descreve os conceitos básicos e parâmetros importantes para a caracterização da sismicidade, abordando alguns dos métodos mais utilizados para a geração de sismos de projeto artificiais e também, apresenta o resumo de um procedimento para avaliação de ameaças sísmicas.

O capítulo 3 é dedicado à revisão do fenômeno da liquefação dinâmica e dos diferentes métodos utilizados para estimativa de resistências residuais. Um

procedimento para análises de estabilidade pós-sismo é também discutido, considerando a possibilidade de ocorrência ou não de liquefação de solos.

No capítulo 4 apresentam-se alguns modelos constitutivos para determinação da geração de poropressões, em termos de tensões efetivas, como os modelos cíclicos de Martin et al. (1975) e de Byrne (1991). O último modelo, utilizado no presente trabalho, é implementado na versão 5 do programa computacional FLAC.

O capítulo 5 descreve as principais características e potencialidades do programa FLAC para a aplicação em problemas geotécnicos envolvendo carregamentos dinâmicos, enquanto que o capítulo 6 é voltado para a descrição da barragem de rejeitos que é investigada nesta dissertação. Apresenta a sua geometria, os tipos de solos e os parâmetros geotécnicos, bem como a discussão dos resultados numéricos da resposta dinâmica da barragem e de estabilidade de seus taludes, na condição pós-sismo de curto e longo prazos.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros, seguidas das referências bibliográficas e de um apêndice e um anexo, o primeiro contendo tabelas que resumem os procedimentos de geração de malha para utilização no programa FLAC e o segundo apresentando a escala de intensidade de Mercalli Modificada.