

1 INTRODUÇÃO

Há quatro métodos geralmente citados na literatura para análise do comportamento de taludes de solo, englobando aspectos de estabilidade e de deslocamentos permanentes (servicibilidade) sob ação de carregamentos sísmicos.

O primeiro deles se refere às análises pseudo-estáticas nas quais os efeitos do terremoto são representados por pseudo-acelerações horizontal e vertical constantes que produzem forças inerciais aplicadas no centro de gravidade da massa deslizante. A primeira aplicação deste procedimento foi atribuída a Terzaghi (1950). É um método simples, atualmente incorporado em muitos programas computacionais para análise da estabilidade sísmica de taludes, considerando superfícies potenciais de ruptura planas, circulares e curvas, mas com precisão dos resultados dependente da precisão dos coeficientes sísmicos, empregados para definição das componentes da força de inércia, na representação das condições reais do problema.

É evidente que a utilização de um método onde as forças de inércia são admitidas constantes constitui-se, à primeira vista, numa abordagem simplificada para a complexa tarefa de analisar-se os efeitos dinâmicos transientes causados por excitações sísmicas em taludes de solo. Além disso, por tratar-se de um método de equilíbrio limite, onde o solo é idealizado como material rígido-perfeitamente plástico, nenhuma informação a respeito dos campos de deformação e de deslocamento pode também ser obtida.

Se o solo fosse realmente rígido, as forças inerciais induzidas pelo terremoto seriam iguais ao produto das acelerações pela massa de material instável. No entanto, reconhecendo o fato de que solos não são materiais rígidos, e de que a aceleração máxima esperada é momentânea e atua apenas em um único sentido, os coeficientes sísmicos utilizados na prática devem corresponder a valores inferiores. Vários pesquisadores sugeriram valores de projeto (Seed, 1979; Hynes-Griffin e Franklin, 1984; Marcuson, 1981) mas não há uma regra fixa, única e simples para a seleção adequada destes coeficientes, a não ser o

conhecimento de que devem estar baseados no nível antecipado de acelerações e correspondam a uma fração da aceleração horizontal máxima (MHEA – *maximum horizontal equivalent acceleration*) esperada no sismo de projeto.

As limitações do método pseudo-estático são conhecidas (*este conceito para análise dos efeitos de terremotos em taludes é muito impreciso, para dizer o mínimo* – Terzaghi, 1950) e uma detalhada análise de deslizamentos históricos (Seed et al., 1969, 1975) mostraram casos de ruptura de taludes mesmo quando o fator de segurança pseudo-estático calculado foi superior a 1. Exemplo é o colapso da barragem Lower San Fernando (figura 1.10), sul da Califórnia, responsável na época por 80% do abastecimento d'água da cidade de Los Angeles, onde a crista da barragem foi rebaixada em 30 pés com deslizamento de talude na face de montante (figura 1.2). Para esta obra, o fator de segurança pseudo-estático calculado no projeto foi igual a 1,3 considerando-se um coeficiente sísmico de 0,15.

Devido a estas dificuldades, tem sido empregados procedimentos alternativos para análise da estabilidade de taludes que levem em conta a ocorrência de deslocamentos permanentes do talude, como o clássico método de Newmark (1965), representativo do segundo tipo de método referenciado na literatura.



Figura 1.1 Vista panorâmica da barragem de Lower San Fernando
(<http://quake.wr.usgs.gov/prepare/factsheets/LADamStory/SanFerValley.gif>)

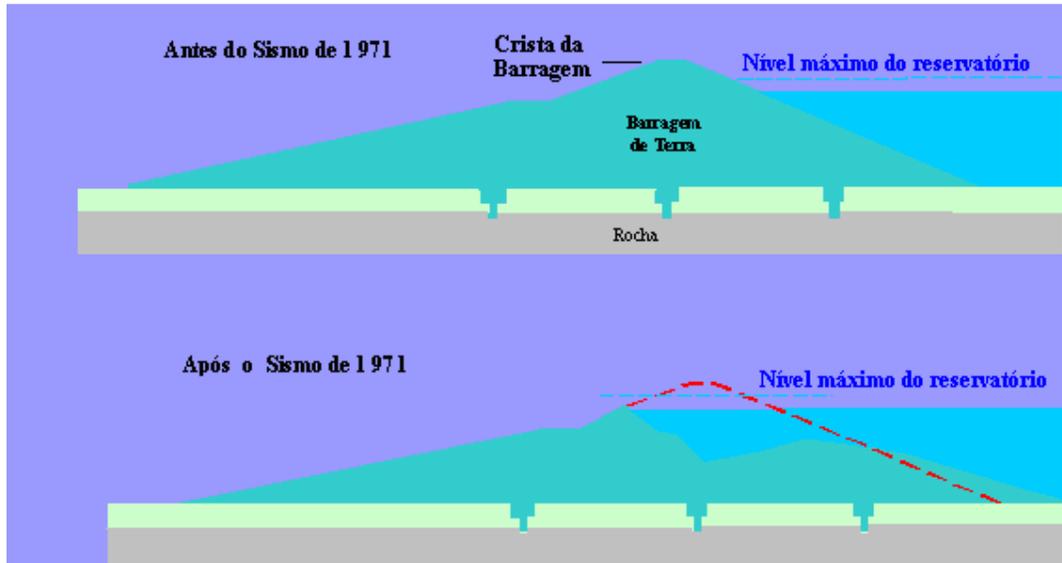


Figura 1.2 Seção transversal da barragem de Lower San Fernando antes e após o sismo de 1971 (<http://quake.wr.usgs.gov/prepare/factsheets/LADamStory/Xsection.gif>)

Desde que a servicibilidade de um talude é controlada pelos deslocamentos permanentes causados pelo carregamento sísmico, procedimentos que permitam calculá-los fornecem em geral informações mais úteis do que apenas um fator de segurança. O método clássico de Newmark (1965) envolve a determinação de uma aceleração de escoamento, definida com base na força inercial necessária para que o fator de segurança pseudo-estático atinja o valor $FS = 1$. Em seguida, o procedimento utiliza o registro da história das acelerações do terremoto de projeto, integrando-o numericamente no tempo por duas vezes sempre que a amplitude da aceleração ultrapassar o valor da aceleração de escoamento previamente estabelecida. Como resultado destas integrações, obtêm-se os deslocamentos permanentes acumulados, já que para fatores de segurança pseudo-estáticos inferiores a 1 (correspondentes a acelerações superiores à de escoamento) a massa de solo não está mais em equilíbrio, sofrendo aceleração devido às forças não balanceadas. Percebe-se assim que os deslocamentos permanentes são afetados pela duração do sismo bem como pela amplitude das acelerações.

A terceira classe geral de métodos é baseada no trabalho de Makdisi e Seed (1978) que apresenta um procedimento simplificado para previsão dos deslocamentos permanentes com base em algumas hipóteses simplificadoras e análises dos resultados obtidos com o método dos elementos finitos e o modelo de vigas de cisalhamento.

A resposta dinâmica do talude de aterro ou barragem é obtida por meio de gráfico construído em função da profundidade da superfície de ruptura, normalizada em relação à altura do talude, e da aceleração horizontal máxima nesta superfície normalizada em relação à aceleração horizontal máxima da crista do aterro.

Investigando o comportamento de vários taludes de barragens e aterros, reais e hipotéticas, considerando-se diferentes registros de acelerações reais e sintéticas, Makdisi e Seed (1978) determinaram a variação dos deslocamentos horizontais permanentes em taludes de solo como função da magnitude do terremoto ($M = 6,5; 7,5$ e $8,25$) e da razão entre a aceleração de escoamento e aceleração horizontal máxima na superfície de deslizamento.

O quarto método para investigação do comportamento sísmico de taludes envolve a análise tensão x deformação do problema dinâmico, normalmente executada com auxílio do método dos elementos finitos ou outra técnica numérica. Os resultados podem descrever a história de tensões, efeitos de amortecimento, frequências naturais e a variação temporal do campo de deslocamentos no talude, entre outros aspectos, mas a precisão dos mesmos dependerá fundamentalmente de uma representação satisfatória do comportamento tensão x deformação dos solos que formam o talude.

Modelos constitutivos para representação do comportamento sísmico de solos podem ser agrupados em 3 classes: modelo linear equivalente, modelos não-lineares cíclicos e modelos elasto-plásticos avançados.

O modelo linear equivalente é o mais simples e mais frequentemente utilizado (GeoStudio 2004), mas, devido à sua natureza elástica, sua habilidade é limitada para representação do comportamento real do material.

Nos modelos não-lineares cíclicos (Finn et al., 1977; Pyke, 1979, 1985; Vucetic, 1990) 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.

1.1 Objetivos da pesquisa e estrutura da dissertação

Esta dissertação tem como objetivo principal a análise do comportamento sísmico de taludes de solo, empregando alguns dos métodos citados anteriormente e comparando os resultados obtidos nos diversos procedimentos. No caso de métodos que incluem a representação tensão x deformação de solos, foram utilizados os modelos disponíveis no programa comercial de elementos finitos GeoSlope v.6 (modelo linear, modelo linear equivalente).

Os exemplos considerados incluem a investigação do comportamento dos taludes de solo da célula n° 2 do sistema de disposição de efluentes líquidos da Unidade de Concentração de Urânio das Indústrias Nucleares do Brasil S.A., situado no município de Caetité no Estado da Bahia (fig. 1.3), bem como um talude de grande altura, situado no sul do Peru, formado por rejeitos do processamento de minérios de cobre por técnica de lixiviação.



Figura 1.3 – Construção da célula n° 2 para disposição de resíduos de urânio (Caetité, BA)

O trabalho desenvolvido está apresentado de acordo com a seguinte estrutura, sob forma de capítulos:

Capítulo 1 – breve revisão dos métodos de análise para comportamento sísmico de taludes, apresentação dos objetivos da dissertação e de sua estrutura;

Capítulo 2 – descrição geral dos métodos pseudo-estáticos, vantagens e desvantagens, com apresentação de propostas publicadas na literatura para seleção do coeficiente sísmico;

Capítulo 3 – apresentação do método clássico de Newmark (1965) para cálculo dos deslocamentos permanentes em taludes de solo a partir da analogia de um bloco rígido deslizando sobre plano inclinado com atrito;

Capítulo 4 – descrição do método simplificado de Makdisi e Seed (1978) para cálculo de deslocamentos permanentes com base em resultados obtidos em análises por elementos finitos e pelo modelo de viga de cisalhamento. Uma adaptação deste método, aplicável para taludes íngremes de solos granulares fracamente cimentados, é também apresentada neste capítulo, tendo em que vista que tais tipos de taludes são comuns ao longo da costa do Pacífico em regiões de atividade sísmica, como na cidade de Lima – Peru.

Capítulo 5 – discussão da aplicação do método dos elementos na análise sísmica de taludes, incluindo aspectos relacionados com modelos constitutivos utilizados na modelagem de problemas dinâmicos em solos.

Capítulo 6 – aplicação do método dos elementos finitos para análise do comportamento sísmico de dois taludes situados no Brasil e no Peru, com apresentação detalhada do modelo constitutivo linear equivalente;

Capítulo 7 – conclusões gerais do trabalho e apresentação de sugestões para prosseguimento das pesquisas na área do comportamento sísmico de taludes de solo.