

4 MÉTODO DE MAKDISI E SEED (1978)

4.1 Método simplificado

Makdisi e Seed (1978) apresentaram um método simplificado para cálculo dos deslocamentos permanentes em taludes de barragens de terra ou aterros baseado numa adaptação (modelo desacoplado) do método de Newmark. Os resultados foram apresentados sob formas de gráficos, obtidos após a aplicação do modelo desacoplado a várias barragens de terra e aterros construídos com solos granulares e coesivos compactados, de 30 a 60m de altura, podendo seus resultados serem também "aplicáveis a aterros mais altos (Makdisi e Seed, 1978)". O procedimento é muito utilizado por engenheiros geotécnicos em todo o mundo.

A base do modelo foi desenvolvida em duas etapas de cálculo, a saber: a) obtenção da história no tempo da aceleração horizontal média na massa de solo instável; b) cálculo dos deslocamentos permanentes com a dupla integração das parcelas das acelerações superiores à aceleração de escoamento a_y , conforme método de Newmark convencional (1965).

Na determinação da aceleração de escoamento, removeram a hipótese de que as resistências estática e dinâmica do solo são iguais, considerando para argilas, solos argilosos, solos granulares secos ou parcialmente saturados e solos granulares saturados densos (solos não propensos à liquefação) o valor correspondente a 80% da resistência ao cisalhamento não-drenada determinada na condição estática.

Para a primeira etapa de cálculo, Makdisi e Seed (1978) usaram o método dos elementos finitos (Idriss et al. (1973) – programa QUAD-4) para obtenção da resposta dinâmica 2D de aterros, considerando o modelo tensão x deformação linear equivalente onde o módulo de cisalhamento G do solo e a razão de amortecimento ξ variam em função das deformações cisalhantes calculadas (Seed e Idriss, 1970). A história no tempo das acelerações horizontais médias da massa de solo instável a diversas profundidades, a partir da crista dos aterros, foi

estimada através da metodologia de Chopra (1966), mencionada no capítulo anterior. O valor máximo da aceleração horizontal média para cada potencial superfície de deslizamento situada na profundidade y a partir da crista foi denominada a_{max} (modernamente HEA) e a máxima aceleração calculada na crista do aterro (ou barragem) designada por \ddot{u}_{max} .

Além destas análises por elementos finitos, foram também compiladas as variações das acelerações máximas com a altura H do aterro publicadas por Seed e Martin (1966) e Ambraseys e Sarma (1967) com o modelo de viga de cisalhamento. Os resultados obtidos por ambos os tipos de análise são mostrados na figura 4.1, onde a diferença entre a curva média e as envoltórias obtidas com os modelos de vigas de cisalhamento variam entre 10% a 20% para $y/H < 0,5$ e entre 20% a 30% para $y/H > 0,5$.

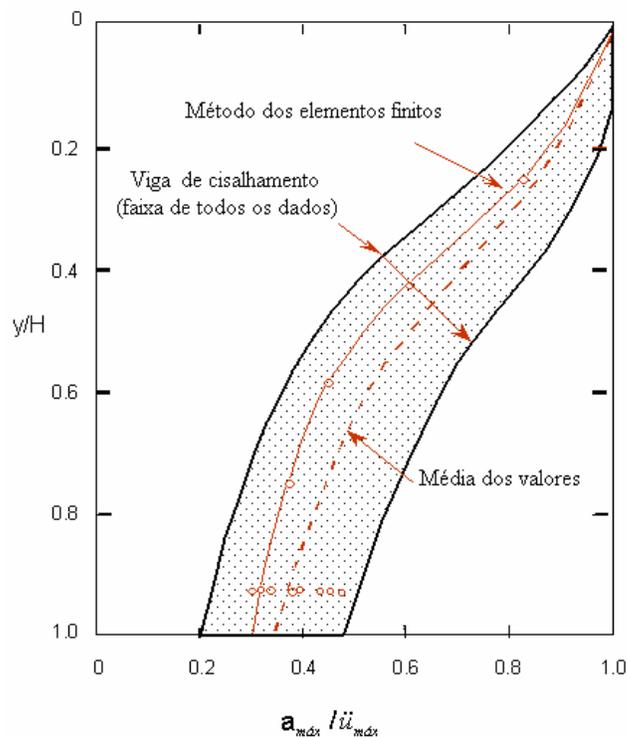


Figura 4.1.- Variação da razão de aceleração com a profundidade da superfície potencial de deslizamento.

Na segunda etapa de cálculo (aplicação do método de Newmark convencional) os registros sísmicos de vários terremotos de grande magnitude ($M = 6,5, 7,5$ e $8,25$), reais ou sintéticos, foram aplicados em aterros, reais ou hipotéticos, com altura entre 23m a 46m, taludes de várias inclinações e

diferentes propriedades dos materiais. Makdisi e Seed (1978) então observaram que para um mesmo valor da razão de escoamento, definida como o quociente entre a aceleração de escoamento a_y e a aceleração horizontal máxima a_{max} os deslocamentos permanentes do talude variavam proporcionalmente entre um valor máximo na crista e um valor mínimo em uma superfície potencial de deslizamento se estendendo através de toda a altura do aterro. Com isto, decidiram ser suficiente determinar os deslocamentos apenas nas profundidades relativas $y/H = 0$ e $y/H = 1$.

Os resultados nesta etapa de cálculo estão mostrados na figura 4.2 e 4.3, onde u representa o deslocamento horizontal permanente e T_0 o primeiro período natural de vibração do aterro. As linhas tracejadas nas curvas de deslocamentos permanentes médios indicam que os resultados obtidos com a hipótese de elasticidade podem ser não realistas ($a_y/a_{max} \leq 0,1$ para $M = 6,5$; $a_y/a_{max} \leq 0,2$ para $M = 7,5$ e $8,25$).

A partir destes resultados, um procedimento simplificado foi então proposto por Makdisi e Seed (1978) para cálculo dos deslocamentos permanentes em um aterro ou barragem de terra, onde é suficiente determinar apenas a máxima aceleração da crista \ddot{u}_{max} e o primeiro período natural de vibração T_0 . Com base nestes valores, a aceleração horizontal máxima a_{max} pode ser determinada da figura 4.1 para qualquer superfície de deslizamento na profundidade relativa y/H . Determinado o valor da aceleração de escoamento a_y em método de equilíbrio pseudo-estático, os deslocamentos horizontais permanentes do talude podem ser finalmente estimados da figura 4.3.

Valores de \ddot{u}_{max} e de T_0 podem ser determinados em análises dinâmicas pelo método dos elementos finitos (por exemplo, programa QUAD-4¹ – Idriss et al., 1973), programas para análise 1D da resposta dinâmica causada por terremotos (por exemplo, programa SHAKE² – Schnabel et al., 1972) mas Makdisi e Seed (1977) apresentaram um procedimento mais simples baseado no modelo de viga de cisalhamento para calcular ambas as quantidades, como descrito no apêndice desta dissertação.

¹ Ou sua versão mais recente QUAD-4M

² Ou sua versão mais recente SHAKE 2000

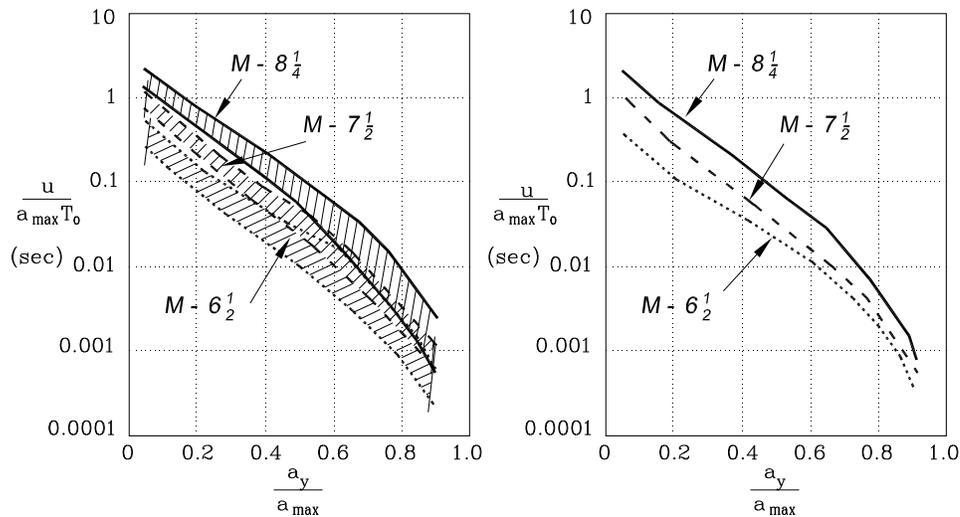


Figura 4.2.- Envoltórias da variação dos deslocamentos permanentes normalizados com a razão de escoamento a_y/a_{max} .

4.2. Caso de taludes íngremes

Taludes íngremes (inclinação superior a 60°) de solos granulares fracamente cimentados são comuns na costa do Pacífico, ao longo das Américas do Norte e do Sul. Um exemplo bastante ilustrativo são os taludes da Costa Verde (figura 4.4), localizados na cidade de Lima - Peru, onde se situa importante rodovia municipal. São formados por material granular fracamente cimentado (conglomerado aluvionar originado por sedimentos do rio Rímac) com intercalações de material fino e aterros superficiais.

Solos granulares cimentados apresentam comportamento de materiais frágeis, com pouca ocorrência de deformações permanentes significativas antes da ruptura, ao contrário de materiais que se deformam plasticamente, como os solos que constituem barragens de terra e aterros em geral. Tipicamente, rompem por tombamento ou por trincas de tração junto à crista seguida de superfície de cisalhamento junto à base do bloco de solo instável.

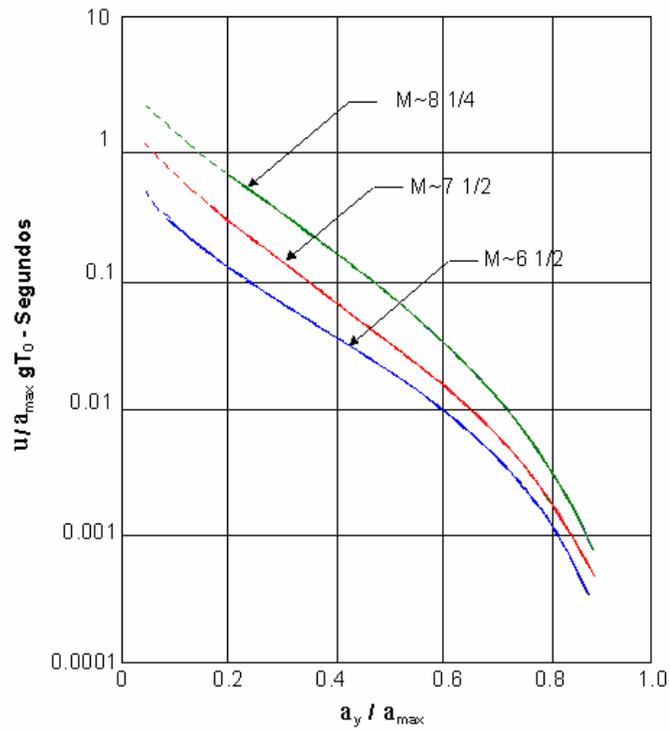


Figura 4.3.- Variação da média dos deslocamentos permanentes normalizados com a razão de escoamento a_y/a_{\max} .



Figura 4.4 - Vista panorâmica da Costa Verde, Lima – Peru.

O método simplificado de Makdisi e Seed (1978) não é aplicável para a análise de tais taludes, principalmente porque o comportamento de materiais frágeis não é condizente com um modelo baseado no cálculo de deformações permanentes (plasticidade perfeita após atingir a aceleração de escoamento). Logo, uma análise de estabilidade baseada em critério de ruptura (método de equilíbrio limite pseudo-estáticos) seria mais indicada do que uma análise em termos de deslocamentos (método de Newmark).

Ashford e Sitar (2002) desenvolveram uma adaptação do método de Makdisi e Seed (1978) para determinação da variação da razão de aceleração a_{max}/\ddot{u}_{max} com a profundidade normalizada da superfície de ruptura em relação à altura do talude (y/H), à semelhança da figura 4.1, porém considerando as características específicas de taludes com extensão infinita e constituído por material granular fracamente cimentado.

A resposta dinâmica de três taludes situados na costa da Califórnia (Seacliff State Beach, com 27m de altura e 75° de inclinação; Daly City com 116m de altura e 45° de inclinação e Pacific Palisades com 61m de altura e 60° de inclinação) foram computadas em análises numéricas 2D considerando-se, para cada um deles, os registros sísmicos dos terremotos de El Centro (18 de maio de 1940 com magnitude $M = 6,9$), de Loma Prieta (17 de outubro de 1989, com magnitude $M = 7,1$) e de Landers (28 de junho de 1992, com magnitude $M = 7,5$). Nas análises numéricas foi considerado o modelo linear equivalente, utilizando as relações estabelecidas por Wang (1986) para variação do módulo de cisalhamento e da razão de amortecimento do material com o nível das deformações cisalhantes.

Em cada análise foram determinadas as histórias de aceleração na crista do talude, na superfície do terreno em ponto distante da crista e no pé do talude. Considerando-se os valores máximos das duas primeiras histórias foi possível avaliar a amplificação da aceleração horizontal devido à topografia do talude e comparando-se as acelerações máximas no pé e na crista do talude foi possível estimar-se a amplificação da aceleração horizontal devido ao solo. Ashford e Sitar (2002) constataram para os casos analisados que a amplificação topográfica é menos importante do que a amplificação do solo, com um valor correspondendo, em média, a 50% da amplificação do solo.

Os resultados obtidos estão apresentados na figura 4.5, podendo-se observar que os mesmos apresentam um maior intervalo de variação do que os obtidos por Makdisi e Seed (1978), com a razão de aceleração aumentando com a inclinação do talude (envoltória superior para o talude Seacliff State Beach, com inclinação de 75°).

Ashford e Sitar (2002) recomendaram o seguinte procedimento simplificado para taludes íngremes:

- a) análise 1D da resposta dinâmica de pontos da superfície do terreno situados distantes da crista do talude, empregando-se programas computacionais como o SHAKE (Schnabel et al., 1972);
- b) para considerar efeitos de amplificação topográfica, a máxima aceleração da crista do talude \ddot{u}_{\max} pode ser estimada aumentando em 50% o valor da aceleração máxima determinada no passo a);
- c) valores normalizados de a_{\max}/\ddot{u}_{\max} , para determinada profundidade y da superfície de ruptura, podem ser estimados da figura 4.5. O valor de $k_{\max} = a_{\max}/g$ deve ser ainda multiplicado por 0,65, como sugerido por Seed e Martin (1966), para obtenção do coeficiente sísmico médio $k_{\text{médio}}$ par a massa de solo instável;
- d) utilizar o valor de $k_{\text{médio}}$ em análises de estabilidade pseudo-estáticas que sejam específicas para taludes íngremes (superfícies de ruptura planas, trincas de tração) como, por exemplo, o método de Hoek e Bray (1981).

4.3. Comentários finais

De acordo com Kramer (1996), o método de Makdisi e Seed (1978) é baseado nas características da resposta dinâmica de aterros (rodoviários, sanitários) e barragens de terra, devendo seus resultados ser interpretados com cautela no caso da aplicação deste procedimento a outros tipos de taludes.

Ashford e Sitar (2002) mencionam também que a hipótese de distribuição uniforme das tensões de cisalhamento em planos horizontais de barragens de terra ou aterros, adotada no modelo de viga de cisalhamento (figura 4.1), não se aplica para outros tipos de talude.

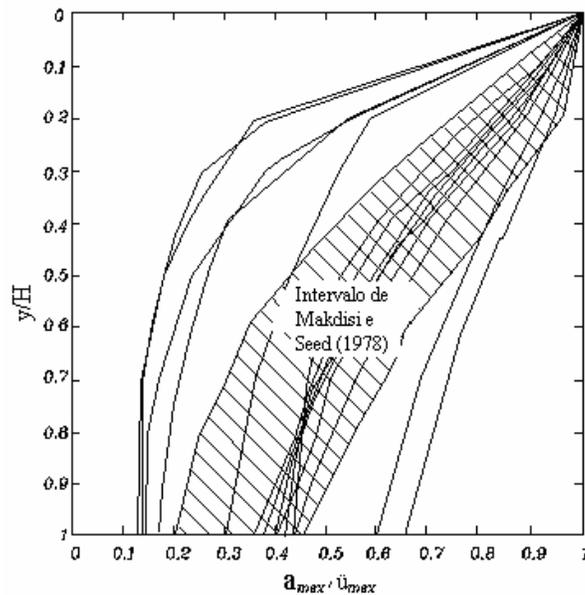


Figura 4.5. Comparação das razões de aceleração nos métodos simplificados de Makdisi e Seed (1978) e Ashford e Sitar (2002).

Wartman, Bray e Seed (2003) comentam que o método desacoplado proposto por Makdisi e Seed (1978) em geral produz estimativas muito conservativas para razões de sintonia inferiores a 2 (observar tendência geral dos métodos desacoplados na figura 3.7), sendo mais preciso para previsão de deslocamentos permanentes com valores da razão de sintonia acima deste limite.

Uma adaptação do método de Makdisi e Seed (1978) para taludes íngremes de solos granulares fracamente cimentados foi proposta por Ashford e Sitar (2002), com base na constatação de que, sendo o comportamento mecânico do material do tipo frágil, é mais adequada uma análise de estabilidade em termos de ruptura do que com base no cálculo de deslocamentos permanentes induzidos pelo carregamento sísmico. A proposta, embora razoável, sofre entretanto da grande dispersão dos resultados obtidos nos poucos casos analisados e de uma comprovação de sua eficiência na análise de outras configurações de taludes e registros sísmicos.