

Um Tratamento Simplificado para Análise de Estabilidade Sísmica de Pequenas Barragens de Terra

Silvio Heleno de Abreu Vieira

Engenheiro Civil Geotécnico, Rio de Janeiro, Brasil, silvioheleno@gmail.com

RESUMO: Este trabalho apresenta um tratamento simplificado no que se refere à questão que envolve o problema de sismicidade em pequenas barragens de terra. Faz-se uma abordagem geral e prática da metodologia de análise de estabilidade com base no modelo estático, usualmente denominado de método pseudo-estático. Apresentam-se os esforços surgentes da atividade sísmica tendo em vista o método em estudo, a forma de interpretação, assim como a influência dos parâmetros de resistência do solo na variação do fator de segurança. Uma metodologia de verificação quanto ao potencial de liquefação do solo de fundação é apresentada de maneira a complementar os resultados das análises através do método pseudo-estático. Por fim, são abordadas as limitações de utilização dos métodos, os quais devem ser restritos a problemas menos complexos quando não se dispõe de ferramentas mais sofisticadas de análise.

PALAVRAS-CHAVE: Método Pseudo-Estático, Barragens de Terra, Análise Sísmica, Estabilidade.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os vários tipos de ruptura que um sismo pode ocasionar em uma barragem de terra, podemos citar como os mais frequentes, os escorregamentos ou distorção do maciço e/ou da sua fundação por ação das tensões de cisalhamento. Estes são praticamente os únicos sobre os quais tem-se desenvolvido métodos analíticos. Para o restante dos possíveis problemas as soluções são detalhes de projeto baseados principalmente na intuição e no bom senso.

A soma de fatores como a sismicidade natural e a induzida, além da consequência catastrófica da ruptura de uma barragem, torna necessário o estudo dos esforços induzidos pelas ações sísmicas em barragens e os seus reflexos em possíveis cenários de falha com estas estruturas.

Segundo GHRIB et al, 1997, existem cinco níveis de análise que são definidos em função do grau de complexidade do fenômeno envolvido na interação do sistema barragem-reservatório-fundação, dos procedimentos de modelagem do sistema em questão e da

representação do movimento sísmico:

1. Análise preliminar (nível 0);
2. Método pseudo-estático (nível I);
3. Método pseudo-dinâmico (nível II);
4. Análise da história linear no tempo (nível III);
5. Análise da história não linear no tempo (nível IV).

A escolha do método mais apropriado de análise depende principalmente da severidade da ação sísmica; da importância da estrutura e as consequências devido a danos e falhas; as propriedades mecânicas iniciais; as condições estruturais da barragem e da precisão demandada pela análise. No entanto, este trabalho limita-se apenas na abordagem do método pseudo-estático, cuja aplicação deve ser restrita a pequenas barragens.

2 MÉTODOS PSEUDO-ESTÁTICOS

2.1 Definição do Método

Os métodos pseudo-estáticos são métodos simplificados de dimensionamento sísmico, cuja aplicação visa a determinação de coeficientes de segurança para os vários mecanismos de ruptura que poderão ocorrer.

Uma abordagem deste método pode ser vista em detalhes no USBR-United States Bureau of Reclamation (1987), bem como em outras normas estrangeiras como USCOLD (1995), FERC (1991) e CDSA (1997).

No método pseudo-estático as forças inerciais e hidrodinâmicas induzidas por terremoto são representadas por cargas estáticas efetivas. A análise supõe para a barragem um movimento de corpo rígido e a água como incompressível. O cálculo dos impulsos sísmicos totais é feito, de uma forma geral, recorrendo a soluções de equilíbrio limite. Admite-se que se forma no solo uma superfície de ruptura ao longo da qual se considera ser a resistência ao cisalhamento completamente mobilizada. Obtém-se assim a carga limite que conduz o solo à ruptura, para a qual se podem definir limites inferiores ou superiores, conforme se use respectivamente o teorema da região inferior ou o teorema da região superior.

2.2 Simplificação do Método

Segundo PEDROSO et al (2005), a análise pseudo-estática é conservativa no que diz respeito às seguintes suposições:

- A continuidade do carregamento sísmico;
- A desconsideração do amortecimento e da energia absorvida pela barragem e fundação;
- A aplicação simultânea das acelerações horizontais e verticais máximas;
- A amplificação das vibrações na barragem, que pode ser importante mesmo em uma pequena barragem.

Ainda de acordo com PEDROSO et al (2005), as simplificações supracitadas do método são fontes de erros uma vez que não levam em conta certos aspectos importantes do sistema completo a ser considerado.

De uma maneira geral, para a aplicação do método pseudo-estático em barragens de terra

temos que considerar algumas hipóteses:

- a) A barragem é suficientemente extensa para que sejam desprezáveis os efeitos tridimensionais;
- b) A análise supõe para a barragem um movimento de corpo rígido, admitindo-se assim que as acelerações horizontal e vertical são constantes e com intensidades iguais às da base, sendo, portanto, as forças adicionais de inércia resultantes da ação sísmica aplicadas no centro de gravidade da massa deslizante;
- c) Não é levada em conta a interação barragem-reservatório-fundação e o efeito de absorção pelo fundo do reservatório;
- d) A água se comporta como um líquido incompressível;
- e) O maciço de fundação não experimenta liquefação sob a ação do sismo.

A hipótese referente à alínea b) é fundamental no que respeita ao problema em apreço: é o fato de se admitir que a barragem se comporta como um corpo rígido que permite substituir a ação sísmica pelas forças de inércia aplicadas no seu centro de gravidade da massa deslizante. A hipótese e) destina-se sobretudo a alertar que é indispensável, no dimensionamento, verificar a segurança em relação a uma possível liquefação do maciço de fundação, provável no caso de este ser constituído por solos arenosos submersos de baixa compacidade.

2.3 Caracterização das Forças Induzidas pela Ação Sísmica

No método pseudo-estático a ação sísmica é considerada através da adição, às forças atuantes, ao peso próprio da massa de solo instável, de forças fictícias, designadas por forças de inércia, e impondo que o sistema de forças assim considerado obedeça às equações de equilíbrio estático. Neste método as forças inerciais induzidas por terremoto são representadas por cargas estáticas efetivas. As forças de inércia são obtidas multiplicando o peso do corpo em estudo, W , por fatores adimensionais, designados por coeficientes

sísmicos, que representam a razão da componente respectiva da aceleração sísmica pela aceleração da gravidade. Dizer-se, por exemplo, que o coeficiente sísmico horizontal é 0.2 significa que a ação do sismo dá origem a uma força de inércia de $0.2W$ com direção horizontal, aplicada no centro de gravidade do corpo em estudo, resultante de uma aceleração sísmica segundo a mesma direção (mas com sentido oposto) de $0.2g$.

A pressão hidrodinâmica do reservatório é calculada em função do coeficiente sísmico horizontal (K_h) e da altura da lâmina d'água (H) usando-se a formulação de WESTERGAARD, 1933. A estabilidade da barragem é normalmente verificada supondo-se que os picos dos movimentos horizontais e verticais do solo ocorram simultaneamente (SOUSA e PEDROSO, 2003), o que de fato não deve ocorrer na prática já que a aceleração máxima geralmente atua em um único instante de tempo e apenas em um único sentido.

As forças surgentes devida à ação sísmica no método pseudo-estático (Figura 1) podem ser equacionadas assim:

$$p(y) = \frac{7}{8} \cdot K_h \cdot \gamma_w \cdot \sqrt{H^2 \left(1 - \frac{y}{H}\right)} \quad (1)$$

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = K_h \cdot W \quad (2)$$

$$F_v = \frac{\pm a_v W}{g} = \pm K_v \cdot W \quad (3)$$

onde:

p_y é a pressão hidrodinâmica devido à ação sísmica;

F_h e F_v as parcelas horizontal e vertical do peso próprio da massa de solo instável devido à ação sísmica;

K é a razão entre a aceleração do terreno (pseudo-estática) e a aceleração da gravidade (a_c/g);

γ_w é o peso específico da água;

a_y e a_v são as componentes horizontal e vertical da aceleração pseudo-estática;

W é o peso da massa de solo instável.

A resultante da pressão hidrodinâmica pode ser facilmente obtida integrando-se a Equação (1) de $y = 0$ até $y = H$, ou seja:

$$H_d = \int_{y=0}^{y=H} p(y) dy = \quad (4)$$

$$H_d = \frac{7}{8} \cdot K_h \cdot \gamma_w \cdot \int_{y=0}^{y=H} \left[\sqrt{H^2 \left(1 - \frac{y}{H}\right)} \right] dy \quad (5)$$

o que resulta em:

$$H_d = \frac{7}{12} \cdot K_h \cdot \gamma_w \cdot H^2 \quad (6)$$

Quanto à direção vertical haverá que, em geral, considerar coeficientes sísmicos com os dois sinais, isto é, forças de inércia dirigidas para cima ou para baixo, de modo a estudar-se o efeito mais desfavorável.

As forças sísmicas assim definidas têm natureza oscilatória, sendo que o método pseudo-estático não considera este efeito. Na prática é feita uma combinação das forças usuais de peso próprio (W), força hidrostática ($\gamma_w H$) e subpressão (u) com as forças provocadas pelo sismo (H_d , F_h e F_v).

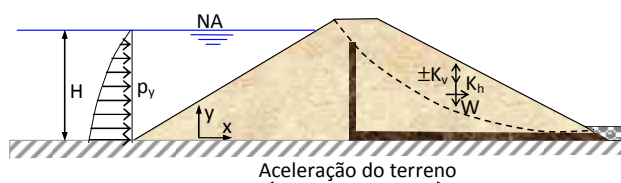


Figura 1 – Modelo de barragem com aplicação das ações sísmicas

Relativamente às ações sísmicas podemos interpretar as recomendações do EUROCÓDIGO 8 para o caso de pequenas e médias barragens de terra, da seguinte forma:

$$K_h = a_c \cdot \frac{S}{r}$$

e

$$K_v = \pm 0.5 \cdot K_h, \text{ se } K \text{ é maior que } 0,6 \text{ ou}$$

$$K_v = \pm 0.33 \cdot K_h \text{ nos demais casos}$$

onde:

a_c é a aceleração pseudo-estática;

S é uma característica do tipo de solo;

r é adotado como 1.5 para deslocamentos admissíveis $\leq 200 \cdot K \cdot S$ e 2,0 para deslocamentos admissíveis $\leq 300 \cdot K \cdot S$.

2.4 Determinação dos Coeficientes Sísmicos

Os sismos podem ser naturais ou induzidos (causados pela ação do homem) e são medidos quanto à magnitude (tamanho) e quanto à intensidade (efeitos causados pelas vibrações). A magnitude é apurada utilizando-se uma escala desenvolvida pelo sismólogo norte-americano Richter. Essa escala é logarítmica, o que quer dizer, por exemplo, que um terremoto de magnitude 5 produz efeitos dez vezes maiores do que outro de magnitude 4, e assim por diante.

Já a intensidade – medida geralmente pela Escala de Intensidade Mercalli Modificada, de 12 graus – revela a violência das vibrações em um determinado lugar e as sensações causadas nas pessoas.

Usualmente, no método pseudo-estático a escolha da aceleração a ser utilizada na análise é feita com base em mapas com estudos específicos contendo curvas de isoacelerações ou com adoção de valores médios de coeficientes sísmicos para cada zona indicada em mapas comuns em países onde a atividade sísmica é constante. O coeficiente sísmico que conduz um fator de segurança igual a 1 (fator de segurança crítico) é denominado coeficiente de fluência.

A aplicação do coeficiente sísmico vertical tem frequentemente pouco impacto no fator de segurança. A explicação para isto é que as forças inerciais verticais alteram o peso da massa de solo instável. Isto altera a força normal atuando na base da superfície de deslizamento, que por sua vez altera a resistência ao cisalhamento. Se, por exemplo, a força inercial tiver o efeito de aumentar o peso da massa de solo instável, a força normal aumenta, e então, a resistência ao cisalhamento aumenta. O atrito mobilizado em função do peso adicionado tende sofrer variação devido ao acréscimo da resistência ao cisalhamento.

Naturalmente, isto é somente verdadeiro para a componente da força devido ao atrito e não para a componente da força devida à coesão do solo.

2.5 Avaliação de uma Análise do Tipo Pseudo-Estática

O fator de segurança em uma análise do tipo pseudo-estática apresenta uma variação não linear em relação ao coeficiente sísmico na avaliação da estabilidade de um talude de barragem.

Na Figura 2 é apresentada uma situação hipotética considerando três tipos de solos distintos, onde foram realizadas análises de estabilidade admitindo valores de coeficientes sísmicos (K) variando de 0 a 4. As curvas que representam o fator de segurança quanto ao cisalhamento do talude em função do coeficiente sísmico obtidas podem ser escritas de acordo com a Equação 7:

$$FS = a \cdot K^2 - b \cdot K + c; \text{ para } K \geq 0 \quad (7)$$

O coeficiente c da Equação (7) apresentada acima, bem como a posição das curvas com relação uma às outras, apresentadas na Figura 2, dependem unicamente dos parâmetros de resistência do solo e da inclinação do talude ora em análise. Já os coeficientes a e b , além de sofrerem ação direta dos parâmetros de resistência solo e da inclinação do talude, são influenciados diretamente pelos coeficientes de sismicidade adotados.

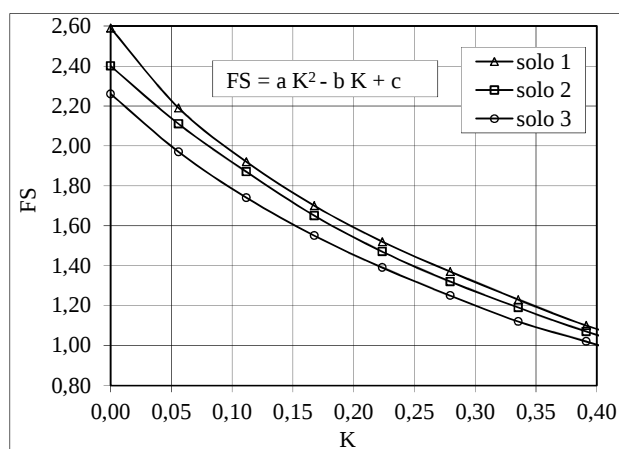


Figura 2 – Variação do fator de segurança em função dos coeficientes sísmicos

3 POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO DO SOLO DE FUNDAÇÃO

Quando a fundação de uma estrutura geotécnica está fundada sobre solos arenosos submersos é importante que se faça uma análise do potencial de liquefação.

Uma metodologia simples foi proposta por SEED e IDRISS (1971) e baseia-se em correlações a partir de ensaios in situ, designadamente ensaios SPT ou ensaios com penetrômetro estático (CPT). Assim, a aplicação do método traduz-se numa comparação entre as tensões de corte induzidas pela ocorrência de um sismo e o estado de tensão existente.

De acordo com o método a Razão de Tensão Cisalhante Cíclica (Cyclic Stress Ratio-CSR), ou tensões de corte induzidas pela ocorrência de um sismo, pode se avaliada, simplificada pela expressão:

$$CSR = \frac{\tau_c}{\sigma'_{v0}} = 0,65 \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_{v0}} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d \quad (8)$$

Onde cada variável envolvida tem o seguinte significado:

τ_c é tensão tangencial média equivalente;
 σ'_{v0} é a tensão efetiva de “overburden”;
 σ_{v0} é a tensão total de “overburden”;
 a_{max} é a aceleração máxima no local;
 g é aceleração da gravidade;
 r_d é o factor de redução função da profundidade.

Na equação supracitada, o 0,65 representa o fator corretivo que transforma os valores das tensões máximas em valores médios.

De acordo com IDRISS (1998;1999), o fator de redução r_d pode ser obtido pela Equação 9 a seguir:

$$\ln(r_d) = \alpha(z) + \beta(z)M \quad (9a)$$

$$\alpha(z) = -1,012 - 1,126 \sin\left(\frac{z}{11,73} + 5,133\right) \quad (9b)$$

$$\beta(z) = 0,106 + 0,118 \sin\left(\frac{z}{11,28} + 5,141\right) \quad (9c)$$

Onde z é a profundidade em metros e M é a magnitude do sismo. No entanto, esta equação é apropriada para $z \leq 34m$. Para $z > 34m$, a seguinte equação é mais apropriada:

$$r_d = 0,12 \exp(0,22M) \quad (9d)$$

A Figura 3 apresenta a curva de r_d para um sismo de magnitude $M=7,5$.

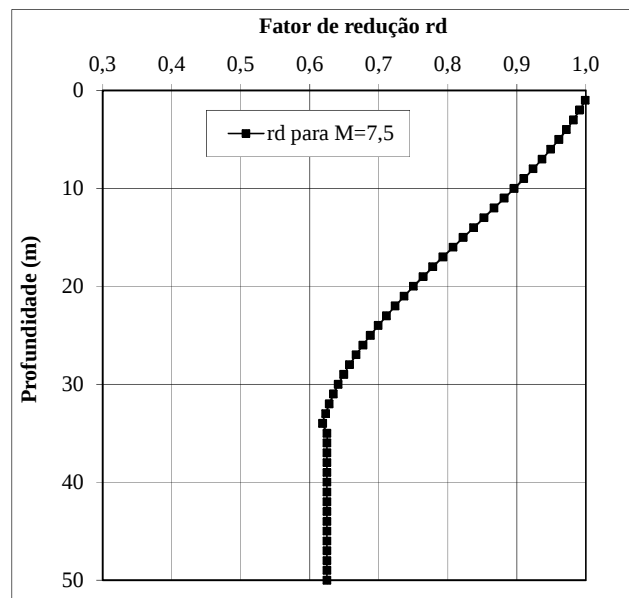


Figura 3 – Exemplo de curva de fator de redução r_d em profundidade para sismo de magnitude $M=7,5$

O estado de tensão existente antes da ocorrência do sismo pode ser caracterizado pelos resultados de ensaios SPT ou CPT. SEED e al (1971), desenvolveram correlações entre o número de golpes $(N1)_{60}$ dos ensaios SPT e a relação τ_c/σ'_{v0} que causa liquefação para sismos com magnitude $M = 7,5$.

A correlação da taxa de esforço cíclico necessária para provocar a liquefação do solo, designada de Razão de Resistência Cíclica (Cyclic Resistance Ratio-CRR), é descrita pela Equação 10, a seguir:

$$CRR = \exp \left\{ \frac{(N_1)_{60}}{14,1} + \left[\frac{(N_1)_{60}}{126} \right]^2 - \left[\frac{(N_1)_{60}}{23,6} \right]^3 + \left[\frac{(N_1)_{60}}{25,4} \right]^4 - 2,8 \right\} \quad (10)$$

Onde $(N_1)_{60}$ representa na equação, notadamente para aplicação em solos arenosos, o número de golpes no ensaio SPT para uma eficiência do martelo de 60%.

Similarmente, segundo IDRISS e BOULANGER (2004), para a aplicação do método utilizando dados de ensaios CPT, tem-se a equação 11 a seguir:

$$CRR = \exp \left\{ \frac{q_{c1N}}{540} + \left(\frac{q_{c1N}}{67} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1N}}{80} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1N}}{114} \right)^4 - 3 \right\} \quad (11)$$

A verificação do fator de segurança (FS_L) quanto ao potencial de liquifação do solo de fundação, admitindo um fator de minoração de 1,25 sobre o valor de CRR, pode ser estimado como a relação entre CRR e CSR da maneira a seguir:

$$FS_L = \frac{CRR}{1,25 \cdot CSR} \quad (12)$$

4 CONCLUSÃO

Devido às limitações na seleção de um coeficiente sísmico apropriado, a análise pseudo-estática não é suficiente para barragens da terra e enrocamento de altura elevada. Para grandes barragens os procedimentos usuais exigem a aplicação de métodos de resposta dinâmica. Entretanto, os métodos pseudo-estáticos seguem em uso por sua simplicidade e rapidez na análise sísmica de barragens de pequena e média altura.

Para barragens construídas sobre solos granulares saturados, fofos a medianamente compactos, submetidas a fortes movimentos

sísmicos, uma causa principal de dano ou falha é o incremento da poro-pressão nos poros do solo granular e a possível perda de sua resistência ao cisalhamento, caracterizando o efeito liquifação. O potencial de liquifação do solo pode ser avaliado preliminarmente, conforme apresentado no item 3. Para uma análise mais aprofundada, torna-se necessário um procedimento de análise através de um método dinâmico, que proporcione uma base mais confiável para avaliar o comportamento sísmico da barragem.

O uso de procedimentos unidimensionais para análise sísmica de barragens não é recomendável para um estudo definitivo, e sim para se ter um conhecimento preliminar do comportamento da barragem quando não se tem disponível outras ferramentas mais sofisticadas. Cabe dizer que a experiência do projetista se torna muito importante até mesmo na seleção de procedimentos, métodos e programas mais adequados para o estudo sísmico de barragens.

5 REFERÊNCIAS

- Eurocode 8 (1988), *Design of Structures For Earthquake Resistance*.
- Ghrib, F.; Léger, P.; Tinawi, R.; Lupien, R. and Veilleux, M. (1997) Seismic Safety Evaluation of Gravity Dams. In: *International Journal on Hidropower & Dams*, v. 4, n. 2, p. 126-138, 1997.
- Idriss, I. M. (1998), Evaluation of Liquefaction Potential, Consequences and Mitigation – An Update; *Presentation notes for Geotechnical Society Meeting*, 17 February 1998, Vancouver, Canada.
- Idriss, I. M. (1999), An Update of the Seed-Idriss Simplified Procedure for Evaluation Liquefaction Potential; *Presentation notes for Transportation Research Board Workshop on New Approaches to Liquefaction Analysis*, 10 January 1999, Washington, DC.
- Idriss, I. M. and R. W. Boulanger (2004), Semi-empirical Procedures for Evaluation Liquefaction Potential During Earthquakes, *11th International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering (ICSDEE) and the 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*; 26p.
- Pedroso, L. J.; Silva, S. F. e Sousa Jr, L. C. (2005), Avaliação Preliminar da segurança Sísmica de um Perfil Típico em Barragem de Concreto Gravidade, Comitê Brasileiro de Barragens, *XXVI Seminário nacional de Grandes Barragens*
- Sousa, L. C. e Pedroso, L. J. (2003), Um Tratamento Simplificado para Avaliação da Segurança Sísmica de

Barragens Gravidade de Concreto – Método Pseudo-Estático; 5p.

United States Department of the Interior: Bureau of Reclamation (1987), Design of Small Dams, Denver.

Westergaard, H. M. (1933), Water Pressures on Dams During Earthquakes. In: Transactions of the *American Society of Civil Engineers*, vol. 98, pp. 418-433.