

CRITÉRIOS DE CÁLCULO AOS SISMOS DE BARRAGENS DE TERRA*

Criteria for Seismic Computations of Earthdams

por
JOSÉ FOLQUE**

RESUMO – Os métodos pseudo-estáticos têm sido ultimamente reputados incapazes para cálculos de dimensionamento de barragens de terra, porque algumas delas que sofreram importantes danos, e mesmo ruína, quando atingidas por um sismo, tinham sido calculadas por esse método. Todas as barragens que sofreram danos importantes tinham sido construídas, total ou parcialmente, com areia, ou eram fundadas em areia.

As barragens construídas com terrenos argilosos bem compactados mostraram grande resistência em relação a acções sísmicas, nenhuma tendo sofrido ruína. Contudo, para sismos intensos, algumas destas barragens sofreram acentuadas deformações, podendo nalguns casos ter ficado comprometido o funcionamento, especialmente por sensível diminuição da folga. Isto justifica que estas barragens sejam calculadas por métodos que incluem o cálculo de deformações, o que obviamente não pode ser efectuado utilizando métodos pseudo-estáticos.

Um cálculo de deformações que mostra, para uma larga gama de dimensões de barragens e para diversas intensidades de sismo de projecto, que as deformações são desprezáveis, pode ser comparado com um método pseudo-estático de forma a determinar que alterações, sobretudo no coeficiente sísmico, têm de ser introduzidas para poder usar este método pseudo-estático assim calibrado, como **método empírico** de cálculo de barragens que se pode antecipar que terão deformações desprezáveis e segurança aceitável em relação ao colapso.

SYNOPSIS – During the last years pseudo-static methods for earthquake safety computations were not considered acceptable owing to the fact that some earthdams, computed using this method, failed, or at least suffered severe damages, when subjected to seismic actions. All of these dams were constructed, total or partially, with sands, or sandy soil occurs in the foundations.

Dams built with well compacted clayey soils, subjected to earthquake, even strong, very seldom (or never) fail with slope slides. But they can suffer high deformations, some of them inconvenient for the functions of the dams. Thus, methods that can allow the computation of deformations are recommended for these dams.

Computing deformations to determine, considering various dimensions of the dams and a range of seisms, the deformations that can be considered negligible, it will be possible to find a pseudo-static method, with convenient modifications, mainly in seismic coefficient, that could be empirically used, in such a way that the compute dams present acceptable safety concerning collapse and negligible deformations.

* Versão portuguesa de uma palestra preparada para ser proferida na Direction-Générale des Infrastructures Hydrauliques (Argélia). Trabalho recebido em Abril de 1986. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

** Engenheiro Civil. Investigador Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

1 – INTRODUÇÃO

Os métodos tradicionais de cálculo de barragens de terra, métodos pseudo-estáticos, têm estado nos últimos anos em desfavor porque se constatou que algumas barragens, dimensionadas utilizando este método, sofreram, mesmo para sismos moderados, importantes danificações. Todas estas barragens danificadas tinham sido construídas com areia, total ou parcialmente, ou eram fundadas sobre solos arenosos. As barragens construídas com solos argilosos bem compactados, pelo contrário, exibem grande resistência em relação a solicitações sísmicas embora algumas possam sofrer importantes deformações. Porque essas deformações podem comprometer o funcionamento da obra, em especial se a folga não for muito grande, reconheceu-se que se tornava necessário passar a usar, para dimensionamento de barragens deste tipo, métodos de cálculo que permitissem determinar as deformações. Isto torna-se sobretudo imperativo para sismos muito intensos e quando o solo de construção da barragem é muito deformável. É evidente que os métodos pseudo-estáticos não podem dar informações, pelo menos directas, sobre esta matéria. Bastará reparar que a deformação final é o acúmulo de deformações provocadas, cada uma por um ciclo de solicitação, para constatar que não será praticável obter esse efeito com uma solicitação permanente, como se aplica nos métodos pseudo-estáticos.

Há métodos, o primeiro dos quais foi proposto por Newmark (1956), que se baseiam na determinação de uma aceleração de cedência que provoca forças que por sua vez actuam ao longo de uma superfície de escorregamento. A deformação permanente, somatório das deformações induzidas por cada ciclo ao longo dessa superfície, será o resultado das acelerações instaladas ao longo dessa superfície que ultrapassem a aceleração de cedência. A "história" das acelerações nessas condições será determinante da deformação permanente. Este método tem recebido alterações e têm-se proposto variantes que o tornam, possivelmente, mais próximo do real. São de citar os trabalhos de Seed (1966), Sarma (1975), Makdisi et al. (1978), e Mineiro (1978).

Deve-se contudo notar que muitos deslizamentos de taludes se dão sem que se forme uma nítida superfície de deslizamento; a plastificação instala-se numa vasta zona e as deformações não se podem avaliar como consequência do deslizamento de um bloco em relação a um remanescente. Justifica-se, por isso, que se tenha procurado um método diferente que, embora de aplicação mais difícil, seja mais consentâneo com a realidade.

2 – MÉTODO DE CÁLCULO DAS DEFORMAÇÕES

O método preconizado por Sterff et al. (1976) comporta a análise dinâmica da barragem e a determinação por via experimental, em laboratório, da resposta do

material constituinte da barragem às solicitações cíclicas. Podem-se assim determinar as extensões induzidas no aterro e daí deduzir as deformações permanentes da barragem.

Nas suas linhas gerais o método aplica-se mediante a realização das seguintes operações:

- estudo e fixação do sismo de projecto;
- aplicação das solicitações correspondentes ao sismo de projecto como input no bed-rock sob a fundação da barragem;
- determinação dos parâmetros característicos da equação constitutiva (não-linear) dos materiais da barragem e da fundação, em relação a solicitações estáticas e dinâmicas;
- discretização da barragem em elementos finitos e determinação das tensões e das extensões instaladas no corpo da barragem que resultam das solicitações estáticas (antes do sismo) para ter, em cada elemento finito, as condições iniciais, às quais se irão sobrepor as solicitações sísmicas;
- determinação das extensões potenciais induzidas pelo sismo no corpo da barragem;
- determinação da deformação global da barragem.

Seguidamente comenta-se cada uma das etapas do método.

2.1 – O sismo de projecto

As características mais significativas de um sismo, no que respeita aos seus efeitos sobre as barragens, são as seguintes:

- aceleração máxima, a_{max}
- período predominante, T_p
- número de ciclos significativos, N

Toma-se, em geral, como período predominante, o período do ciclo que apresenta a aceleração máxima.

A aceleração máxima e o número de ciclos significativos dependem da magnitude do sismo, M , e da distância ao epicentro, R . Um certo número de correlações empíricas têm sido propostas para ligar a_{max} com M e R . Uma correlação que tem dado resultados com boa concordância, para as regiões vizinhas do Mediterrâneo, é a fórmula de Donovan.

$$a_{max} = \frac{1080 e^{0.5 M}}{(R + 25)^{1.32}} \quad \begin{array}{l} a_{max} - \text{cm/s}^2 \\ R - \text{km} \end{array}$$

Para Portugal a questão toma aspectos mais difíceis, pois os mais fortes sismos que ocorrem em território português têm o foco no contacto das placas africana e euro-asiática. Para estes sismos não se dispõe por enquanto de fórmulas de atenuação de boa adequação. Só para os sismos que têm o seu foco nas falhas intraplacas as fórmulas de atenuação clássicas apresentam validade para a região portuguesa. Mas estes sismos são os mais fracos que ocorrem em Portugal.

Voltando ao caso do Mediterrâneo onde, como ficou dito, é válida a fórmula de Donovan, para um certo local de barragem compete aos sismologistas fixar a magnitude e a localização provável do mais intenso sismo que é expectável durante o período de vida da barragem. Estes trabalhos, é de sublinhar, devem ser conduzidos em estreita colaboração entre engenheiros, geólogos e sismologistas. O engenheiro fixará a vida útil da barragem (período de recorrência do sismo de projecto). Aos geólogos competem os estudos tectónicos. O sismologista fará a estima da magnitude e localização do foco do sismo expectável.

Fixados M e R , utilizando uma fórmula de atenuação, por exemplo a fórmula de Donovan já citada, ter-se-á a_{max} . Depois de fixados M e a_{max} procurar-se-á o sismograma de um sismo com a mesma magnitude. O sismograma será normalizado para ficar a exibir a a_{max} do sismo de projecto. Ficar-se-á então a dispor de um sismograma com o mesmo a_{max} do sismo expectável e T_p e N com valores de muito alta probabilidade de ocorrência. Este sismograma será em seguida digitalizado para ser introduzido num programa de computador e utilizado como input no bed-rock da barragem.

A este método pode-se objectar que ele se baseia na escolha de um dado sismograma enquanto que, por outro lado, a barragem pode ter que resistir a sismos que, embora com o mesmo a_{max} , tenham sismogramas acentuadamente diferentes (diferentes densidades espectrais). Talvez seja então preferível proceder desta outra forma:

- fixar os limites de deformação que a barragem pode sofrer sem comprometer as suas condições de serviço;
- procurar as acelerações que são capazes de produzir essas deformações e compará-las com as acelerações que são espectáveis durante a vida da obra.

Os processos de cálculo que se comentam em seguida aplicam-se às duas vias metodológicas citadas.

2.2 – Cálculo para solicitações estáticas

Porque as características reológicas dos solos dependem do estado de tensão torna-se necessário determinar a distribuição de tensões na barragem, antes do sismo,

para poder atribuir a cada elemento finito os parâmetros da sua equação constitutiva.

Calculam-se as tensões e as extensões em situação estática, antes do sismo, tomando uma reologia não-linear, o que leva a que se faça o cálculo por incrementos, de certo modo reproduzindo o crescimento da barragem durante a construção. Para reproduzir essa fase de construção basta adoptar 8 a 10 camadas.

O que ficou dito é equivalente a dizer-se que, conhecendo a curva tensões-extensões, e consequentemente os respectivos módulos de elasticidade tangentes, conduz-se o cálculo de forma incremental. A curva tensões-extensões que em geral se admite é uma hipérbole. É fácil deduzir as expressões que dão os módulos de elasticidade, volumétrico e transversal, ao longo da curva tensões-extensões (Serff et al., 1976). E desta forma determina-se as distribuições de tensões e extensões, no corpo da barragem, para solicitações estáticas.

2.3 – Cálculo para solicitações dinâmicas

Como hipótese fundamental para o cálculo em relação a solicitações dinâmicas admite-se que o sismo é transmitido à barragem a partir de um *bed-rock* rígido. As forças exteriores aplicadas à barragem são forças de corte transmitidas pelo *bed-rock*, o que significa que se desprezam as componentes horizontais das solicitações sísmicas.

Para fazer o cálculo, por elementos finitos, das tensões induzidas na barragem pelo sismo, é preciso saber atribuir a cada elemento, cujo estado de tensão inicial já foi determinado, como ficou dito, o respectivo módulo de elasticidade dinâmico, G_{din} , e o coeficiente de amortecimento.

Valores de G_{din} encontram-se na bibliografia especializada (por exemplo, Serff et al., 1976) e pode-se também proceder à sua determinação por prospecção geofísica, medindo a velocidade de propagação das ondas de corte. Valores do amortecimento encontram-se também na bibliografia especializada (ibidem).

Depois de conhecer as tensões induzidas na barragem pelo sismo procede-se à determinação das respectivas extensões. Para isso tem de recorrer-se a uma muito criteriosa pesquisa experimental, por meio de ensaios triaxiais cíclicos.

2.4 – Ensaios triaxiais cíclicos

Cada ensaio é conduzido para uma tensão de consolidação constante, σ_{3c} , e é realizado aplicando um certo número de acréscimos à tensão vertical, acréscimos que constituem tensões adicionais cíclicas, σ_{dp} . Regista-se a deformação axial, ϵ , e a

pressão de poros correspondente a cada ciclo. Constrói-se o diagrama de evolução destas grandezas em função do número de ciclos de solicitações aplicadas.

Uma série de ensaios compreende em geral o estudo de três amostras, cada série para um certo valor de σ_3 e da relação de consolidação $K_c = \sigma_1/\sigma_3$; cada amostra, por seu turno, é ensaiada para um certo valor de σ_{dp} .

Realizam-se, da mesma maneira, ensaios sobre diversas séries de amostras, para diferentes valores de σ_3 e da relação K_c (para reproduzir as condições de tensão iniciais nos diferentes elementos finitos do corpo da barragem) e para diversos valores de σ_{dp} . Obtêm-se desta maneira as curvas que dão as extensões em função das tensões cíclicas (aplicadas N vezes com o período T_p , características do sismo do projecto) para as diferentes zonas da barragem. Como as tensões cíclicas induzidas pelo sismo no corpo da barragem são conhecidas (ver 2.3) é assim possível determinar as correspondentes extensões. Note-se que estas extensões são extensões potenciais nos elementos, quer dizer, são as extensões que neles se verificariam se eles não estivessem constringidos pelos elementos vizinhos. Mas, para ter as extensões reais, é necessário efectuar a compatibilização dos diferentes elementos.

2.5 – Cálculo das deformações globais da barragem

Como ficou dito, as extensões potenciais dos diferentes elementos têm de ser compatibilizadas com as extensões dos elementos vizinhos para ter as extensões reais.

Mesmo antes de efectuar essa compatibilização pode-se já ter uma primeira ideia no que respeita à ordem de grandeza das possíveis deformações da barragem. Se, por exemplo, a extensão 5% não é atingida em nenhuma zona da barragem, pode-se antecipar que as deformações globais serão muito modestas. Pelo contrário, se nalguns elementos se determinam extensões da ordem dos 20%, pode-se suspeitar que as deformações globais da barragem serão excessivas.

Para ter uma ordem de grandeza, ainda grosseira, mas já quantitativa, das deformações globais, pode-se recorrer a um método simplificado de aplicação muito fácil: toma-se a média das extensões potenciais da secção média vertical da barragem e multiplica-se pela altura desta.

Um outro método, bastante mais preciso, é um método pseudo-estático. Aplica-se, em cada nó da malha de elementos finitos, a força que corresponde à extensão potencial induzida nessa zona. Essas forças são consideradas como forças de corte em cada elemento e as deformações que a partir daí se podem calcular, tendo em conta as características elásticas não-lineares do material, correspondem, com precisão aceitável, às deformações globais.

3 – MÉTODOS PSEUDO-ESTÁTICOS

Recentemente (Hynes-Griffin e Franklin, 1984) foi conduzido na Waterways Experimental Station (Vicksburg) um estudo que conduz à justificação **empírica** da aplicação do método pseudo-estático, levando em conta o problema das deformações, embora de forma só qualitativa. As bases deste estudo são as seguintes:

- para sismos com epicentros a algumas dezenas de quilómetros e com magnitude não excedendo 8, as barragens construídas com solos argilosos sofrem deformações desprezáveis;
- cálculos conduzidos pelo método de Newmark mostram que deformações que se podem considerar desprezáveis, para barragens de diferentes alturas e para diversos valores da aceleração, podem ser dimensionadas usando um método pseudo-estático com coeficiente sísmico igual a metade da aceleração máxima no *bed-rock*.

Nos cálculos deve-se tomar, para a resistência ao corte, a envolvente das resistências não-drenadas (na região de baixas tensões de consolidação) e das resistências drenadas (na região das altas tensões de consolidação). As resistências ao corte devem ser minoradas multiplicando-as pelo factor 0,8.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece aos Eng.^{os} Oliveira Pedro e Maranha das Neves as suas críticas e sugestões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HYNES-GRIFFIN e FRANKLIN (1984) – *Rationalizing the seismic coefficient method*. Paper GL-64-13, US Waterways Experimental Station, Vicksburg – US Army Corps of Engineers, Washington, Julho.
- MAKDISI e SEED (1978) – *Simplified procedure for estimating dam embankment earthquake induced deformations*. ASCE, Journal GT7, Julho.
- MINEIRO, A. C. (1978) – *Comportamento sísmico de barragens de terra*. Geotecnia n.º 24, Novembro.
- NEWMARK (1965) – *Effects of earthquakes on dams embankments*. Geotechnique, n.º 2, Junho.
- SERFF, SEED, MAKDISI e CHANG (1976) – *Earthquake induced deformations of earthdams*. Report EER 76-4, University of California, Berkeley, Setembro.