

ANÁLISE PRELIMINAR DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS DE BARRAGENS

GUILHERME OLIVEIRA FERRAZ DE PAIVA¹

¹Mestrando em Estruturas, UnB, Brasília-DF, guilheerme_07@hotmail.

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016
29 de agosto a 2 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil

RESUMO: Este trabalho teve como objetivo analisar os modos de vibração aos quais está submetida à estrutura de uma barragem e, desta forma, identificar o nível de análise dinâmica exigido pela mesma levando-se em conta o método de análise progressiva. Para tanto, foi simulado numericamente um modelo genérico utilizando como ferramenta computacional o software SAP2000. Quanto ao nível de análise dinâmica exigida pelo modelo, dados o período fundamental obtido, observou-se que o modelo pseudo-estático é bastante razoável para uma possível análise dinâmica completa. Os resultados de período e frequência apresentaram boa convergência quando comparados à modelos encontrados na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem, estrutura, análise dinâmica, modos de vibração.

PRELIMINARY VIBRATION ANALYSIS AT DAM STRUCTURES

ABSTRACT: This study aimed to analyze the modes of vibration to which the structure of a dam is submitted and thus, identify the level of dynamic analysis required by the same taking into account the progressive method of analysis. Thus, it was numerically simulated using a generic model using as computational tool the software SAP2000. As to the level required by dynamic analysis model data obtained from the fundamental period, it was observed that the pseudo-static model is quite reasonable for a possible complete dynamic analysis. The results of the period and frequency showed good convergence when compared to models found in the literature.

KEYWORDS: Dam, structure, dynamic analysis, vibration modes.

INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas de grande porte que se destinam principalmente à produção de energia elétrica, controle de cheias, navegação, recreação, entre outras aplicações. De toda maneira, as barragens atuam como contenção de cursos d'água e, dado o enorme volume de água armazenado é muito importante projetar estruturas viáveis economicamente e com elevado nível de segurança (Oliveira, 2002).

Falhas envolvendo este tipo de estrutura não são frequentes dados os diversos critérios de segurança que devem ser respeitados tanto na fase de projeto como na de execução.

Devido à complexidade de análise das tensões em estruturas como barragens, geralmente utiliza-se modelagens numéricas associadas a recursos computacionais nos trabalhos de cálculo.

Uma análise importantíssima que deve ser feita é a análise dinâmica da estrutura, visto que uma barragem esta sujeita a carregamentos diversos que provocam vibrações na estrutura (vento, impacto de possíveis ondas formadas na bacia de armazenamento) e, neste sentido, é necessário verificar se tais vibrações estão dentro dos limites físicos de segurança da estrutura frente ao colapso.

MATERIAIS E MÉTODOS

A combinação de carregamentos a considerar é o primeiro passo para o início da análise. Villeux (1999) explica os três tipos de combinações de cargas que devem ser verificados na avaliação da segurança da estrutura: (a) Condições normais de operação, (b) condições excepcionais e (c) condições extremas. Desta forma, avalia-se àquelas combinações que geram momentos máximos e/ou mínimo.

Vários são os métodos que permitem avaliar o comportamento sísmico de uma barragem. Estes variam em função de sua complexidade. A aplicação de um ou outro (ou de vários) está ligada à complexidade da estrutura analisada. Segundo Oliveira (2002), normalmente o que se faz é uma análise progressiva partindo de métodos simplificados até soluções numéricas avançadas. Três passos são necessários segundo Ribeiro (2006): a estimativa dos movimentos do solo e suas características, captação e registro deste movimento e, por fim, análise e interpretação da resposta dinâmica do sistema barragem-reservatório-fundação (ou BRF).

Segundo Ribeiro (2006), há cinco níveis de análise definidos segundo o grau de complexidade dos fenômenos envolvidos na interação do sistema estrutural da barragem, do modelo adotado para estudar o sistema e dos sismos envolvidos. São eles:

- a) Análise preliminar (Nível 0);
- b) Método Pseudo-Estático ou Método do Coeficiente Sísmico (Nível I);
- c) Método Pseudo-Dinâmico ou Método de Chopra ou resposta espectral (Nível II);
- d) Análise da história linear no tempo ou no domínio da frequência (Nível III);
- e) Análise da história não linear no tempo (Nível IV).

Ainda segundo Ribeiro (2006), a escolha do método apropriado de análise depende da severidade dos sismos esperados do solo, da importância da estrutura e das consequências caso falhas ou danos venham a ocorrer, da estrutura da barragem em si e das suas condições mecânicas, da precisão desejada e da vida útil projetada para a barragem.

Por fim, com base nos dados obtidos na análise sísmica da estrutura, avalia-se a segurança sísmica da mesma, verificando se ela resiste ao deslizamento, tombamento e se as tensões geradas respeitam os limites admissíveis (Oliveira, 2002).

De início, o que se faz é uma análise preliminar (Nível 0) da severidade das atividades sísmicas do local. Este estudo preliminar determinará a necessidade ou não de uma análise dinâmica da estrutura. Segundo ICOLD (1986 apud Oliveira, 2002) é exigida a análise para esforços dinâmicos quando a Aceleração de Pico do Solo (PGA) for maior que 0,25g (g corresponde à aceleração da gravidade). USCOLD (1995 apud Oliveira, 2002) recomenda a análise dinâmica quando o PGA for maior que 0,20g, para barragens com mais de 30,5 m de altura, ou em barragens com altura inferior a 30,5 m, quando o PGA for superior a 0,4g.

Em caso positivo para a necessidade da análise dinâmica, seguindo a metodologia da análise progressiva anteriormente descrita, utiliza-se de início o método pseudo-estático (Nível I) que possui três hipóteses fundamentais (Ribeiro, 2006): a aceleração é constante ao longo da barragem, e é igual à aceleração sísmica de uma fundação infinitamente rígida; as forças de inércia são aplicadas no centroide da barragem e as tensões induzidas por terremotos na estrutura são determinadas por meio de análise estática equivalente. Em resumo, este método se baseia na aplicação de coeficientes sísmicos (frações da aceleração da gravidade) que representam uma aceleração efetiva constante aplicada na barragem ao longo de sua altura. Obtêm-se então as forças de inércia multiplicando aquela aceleração pela massa da barragem.

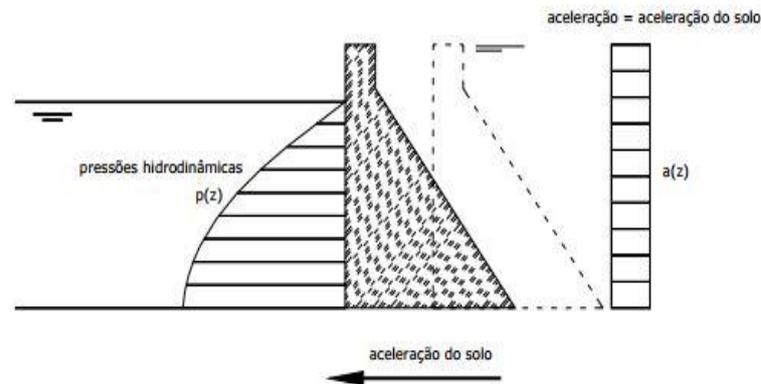
Para USCOLD (1995 apud Oliveira, 2002, p. 30), o método pseudo-estático se aplica bem a estruturas com períodos fundamentais de vibração inferiores a 0,33s para as quais recomenda aplicar a aceleração de pico do solo para a obtenção das forças de inércia. Para as estruturas com períodos fundamentais de vibração maiores que 0,33s, caso se aplique este método, deve-se utilizar aceleração espectral correspondente ao período fundamental medido para a estrutura, o chamado Nível II. Caso os modos de vibração sejam considerados relevantes, pondera-se a aceleração correspondente ao primeiro modo de vibração em 1,5 (Oliveira, 2002). A figura 1 esquematiza o método descrito acima.

Caso o nível I não seja suficiente, passa-se ao Pseudo-Dinâmico (Nível II). Este procedimento foi desenvolvido por Chopra (1978) com o intuito de calcular manualmente problemas mais complexos que exigiriam a utilização de computadores para uma análise mais precisa. Trata-se basicamente, de uma análise simplificada da resposta dinâmica da estrutura, pois leva em consideração apenas a deformação da estrutura no modo fundamental de vibração. A desvantagem deste método é não considerar a natureza oscilatória e as características de curta duração da carga sísmica, visto que a aplicação da mesma é feita de forma estática.

Por fim, executa-se a Análise Dinâmica (Níveis III e IV) quando há a necessidade de uma análise mais refinada. Em geral são utilizados os métodos de análise por superposição modal, que levam em conta os modos naturais de vibração da estrutura. Assim, combinando os vários modos de

vibração da estrutura, é possível obter a resposta da mesma a uma determinada excitação. Se a frequência de excitação for igual a uma frequência natural da estrutura, pode ocorrer o fenômeno da ressonância da estrutura (Oliveira, 2002). Tal fenômeno deve ser evitado porque pode levar a estrutura ao colapso.

Figura 1. Esquema Método Pseudo-Estático.



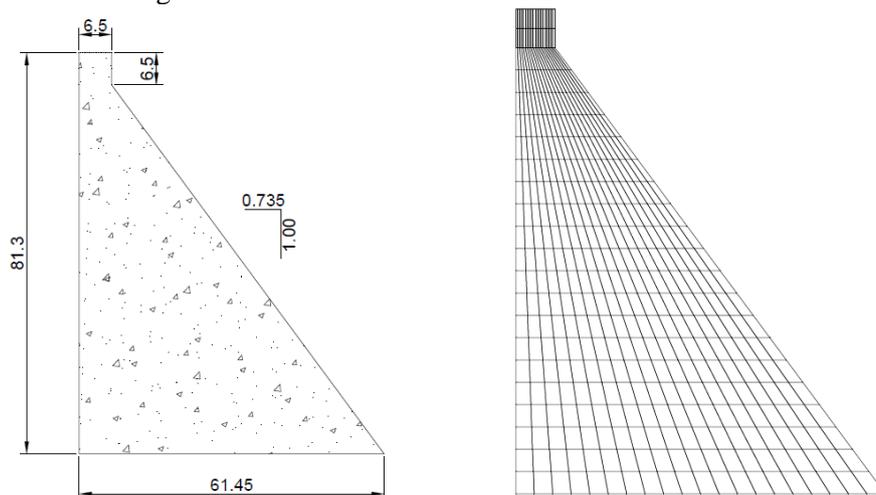
Fonte: Ribeiro (2006).

Outro método bastante utilizado é o método da integração direta passo a passo no domínio do tempo. Este método se apoia na resolução das equações de equilíbrio dinâmicas em trechos lineares de tempo por meio de integração numérica. É o método mais complexo dos métodos de análise, porém, é o mais preciso. Através dele é possível obter os deslocamentos, velocidades, acelerações ou esforços em qualquer ponto da estrutura ao longo do tempo (Oliveira, 2002).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o intuito de avaliar a funcionalidade do método acima citado, foi realizada uma análise numérica de um modelo (didático) de barragem, utilizando como suporte o software SAP2000. O modelo elaborado neste artigo foi pensado para assemelhar-se ao modelo utilizado por Ribeiro (2006) para que se tivesse um parâmetro quanto à convergência dos resultados fornecidos pelo SAP2000. O software baseia suas análises no Método dos Elementos Finitos e, desta forma, foi necessário dividir a estrutura em elementos menores. O modelo utilizado, bem como a discretização adotada podem ser vistos na figura 2.

Figura 2. Modelo de barragem analisado e malha de elementos finitos.



Optou-se por utilizar elementos retangulares. Ao todo 440 elementos de área, tridimensionais, de oito nós cada, possuindo cada nó 02 graus de liberdade. Aplicou-se uma carga distribuída triangular na parede lateral esquerda, calculado em função do peso específico da água e da altura da coluna do

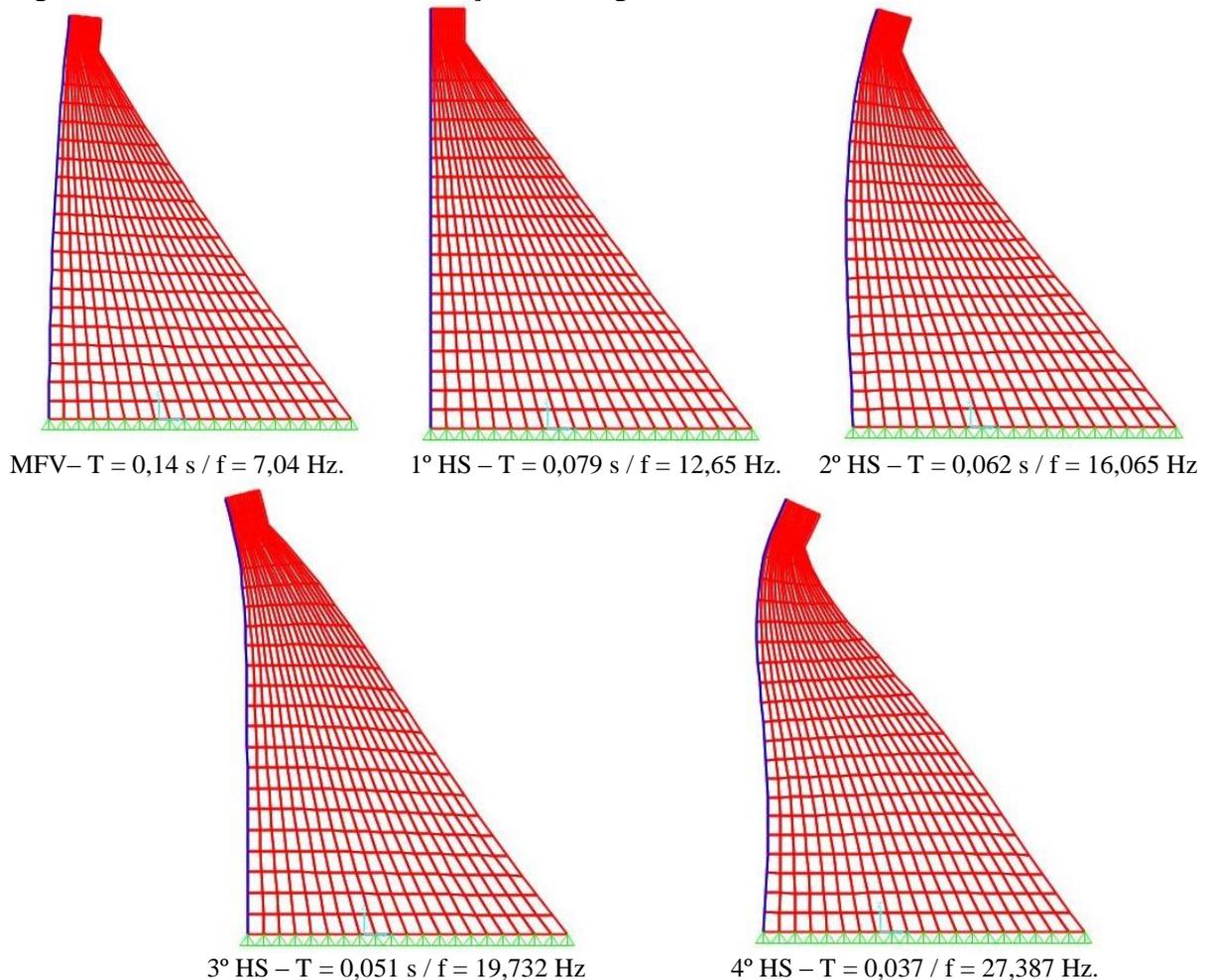
reservatório, simulando desta forma o empuxo na parede da barragem (considerou-se o nível do reservatório igual à altura do maciço: 81.3). Adotou-se espessura 1.00 para os elementos, sendo este valor correspondente à espessura da seção analisada. A Figura 3 apresenta um corte da região superior do modelo. Nela é possível observar mais detalhadamente o aspecto 3D da malha.

Figura 3. Vista 3D da malha – corte superior.



Para a análise modal, o software foi programado para calcular os modos de vibração pelo sistema de autovalores-autovetores, aplicando-se um fator de tolerância para convergência de $10e-9$ visando obter resultados com boa aproximação. Com a estrutura devidamente modelada e as situações de forma e carga devidamente estabelecidas, executou-se a análise MODAL da mesma, visando obter o modo fundamental de vibração (MFV) bem como os harmônicos superiores (HS's). Os resultados podem ser observados na Figura 4.

Figura 4. Modos fundamentais de vibração da barragem.



CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou o quão delicado é o processo de análise dinâmica de barragens e o quanto criterioso deve ser o engenheiro ao analisar este tipo de estrutura.

A partir dos resultados gerados pelo SAP2000, percebe-se que os períodos fundamentais da mesma são inferiores ao limite estabelecido pelo USCOLD (1995) para a aplicação do método pseudo-estático. O maior período obtido foi $T = 0,142$ s referente ao primeiro modo de vibração. Inferior, portanto, ao limite de $T = 0,33$ s estabelecido pelo código Americano.

Portanto, o método pseudo-estático forneceria uma análise dinâmica com resultados satisfatórios para a barragem deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A CAPES pela concessão de bolsa de pesquisa ao autor.

REFERÊNCIAS

- Oliveira, F.F. (2002). Análise de Tensões e Estabilidade Global de Barragens de Gravidade de Concreto. Dissertação de Mestrado, Publicação E. DM-015 A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 169p.
- Ribeiro, P. M. V.; Pedroso, L. J. Um procedimento semi-analítico para a análise dinâmica de barragens de concreto. Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, v. 10, n. 3, p. 45-66, Passo Fundo, 2013.
- Ribeiro, P. M. V. (2006). Uma Metodologia Analítica para a Avaliação do Campo de Tensões em Barragens de Concreto Durante Terremotos. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E. DM – 003 A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104p.
- Santos, A. A.; Lopes, R. C.; Lopes, P. A.; Castro, L. C. L. B. de. Elaboração de um tutorial do SAP 2000 para o estudo de vibrações livres em pórticos espaciais. XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE, 2007.