



COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO PSEUDO-DINÂMICO E O MÉTODO ESPECTRO RESPOSTA APLICADO COMO ANALISE SÍSMICA EM UMA BARRAGEM TIPO: ESTUDO DE CASO ITAIPU

Edivaldo José da Silva Junior

Federal University of Latin American Integration - UNILA

edivaldo.jsj@unila.edu.br

Av. Silvio Américo Sasdelli - 1842, 85866-000, Foz do Iguaçu, Parana, Brazil

Luis Antonio Sucapuca Aracayo

luis.aracayo@pti.org.br

Itaipu Technology Park Foundation - FPTI

Av. Presidente Tancredo Neves - 6731, 85866-900, Foz do Iguaçu, Parana, Brazil

Dimilson Pinto Coelho

dimilson@itaipu.gov.br

Itaipu Binacional

Av. Tancredo Neves - 6731, 85866-900, Foz do Iguaçu, Parana, Brazil

Resumo. *Este trabalho apresenta uma metodologia de analise sísmica em barragens, aplicando o Método Pseudo-dinâmico proposto por Chopra em 1978. Este método permite calcular o comportamento de uma barragem no seu modo fundamental de vibração, submetida a ações sísmicas em uma análise estática. São considerados os efeitos da elasticidade da estrutura e a compressibilidade da água. O Método Pseudo-Dinâmico é utilizado para avaliar um perfil tipo do Trecho E da Barragem de ITAIPU, considerando os critérios sísmicos recomendados pela ELETROBRÁS (2003). Posteriormente é feita uma análise de resposta espectral utilizando o software ANSYS para comparar com os resultados do método pseudo-dinâmico.*

Palavras chaves: *Pseudo-dinâmico; Barragem de contraforte; ITAIPU; MEF.*

Abstract. *This work present a methodology of seismic dams analysis, using the Pseudo-dynamic Method proposed by Chopra in 1978. This method calculate the dam fundamental mode vibration behavior, submitted to seismic actions considering a static analisys. The structure elasticity effects and the water compressibility are considered. The pseudo-dynamic method is used to evaluate a block E of ITAIPU, considering ELETROBRÁS (2003) criteria seismic condition. Afterwards, a spectral response analysis using the ANSYS software is used to compare the results of the pseudo-dynamic method.*

Keywords: *Pseudo-dynamic; Buttress dam; ITAIPU; MEF.*

INTRODUÇÃO

A preocupação com a segurança sísmica de barragens é crescente e embora existam poucos registros sísmicos de alta intensidade no Brasil, os possíveis efeitos que este pode causar em uma barragem justifica o investimento em estudos de estabilidade em relação ao sismo.

Para avaliar o desempenho de uma barragem quanto à segurança sísmica, deve-se considerar a interação entre as componentes do sistema formado pela barragem, reservatório e fundação (BRF). Posteriormente, deve-se estimar o movimento do solo, e finalmente, a resposta dinâmica da estrutura.

A análise de estabilidade sísmica de barragem pode ser realizada com diversos métodos e níveis diferentes. Ribeiro (2006) define cinco níveis de análise que são categorizados em função da complexidade do fenômeno, envolvendo a interação do sistema BRF. O nível zero (0) consiste na análise preliminar do local através dos estudos históricos. No nível um (1) aplica-se o Método Pseudo-Estático. O nível dois (2) aplica-se o Método Pseudo-Dinâmico ou resposta espectral. No nível três (3), realiza-se uma análise da história linear no tempo e no nível (4) a análise histórica não linear no tempo.

O objetivo deste trabalho é apresentar os estudos para a aplicação do Método Pseudo-Dinâmico em um bloco da barragem de Contrafortes de ITAIPU BINACIONAL.

O Método Pseudo-Dinâmico ilustrado na Figura 1, permite calcular o comportamento de uma barragem submetida a ações sísmicas, considerando os efeitos da elasticidade da estrutura, fundação rígida e a compressibilidade da água na interação entre o paramento de montante e o reservatório. Trata-se de um procedimento simplificado para obtenção de uma resposta espectral da estrutura, considerando que se encontra em ressonância na sua primeira frequência natural (RIBEIRO, 2006).

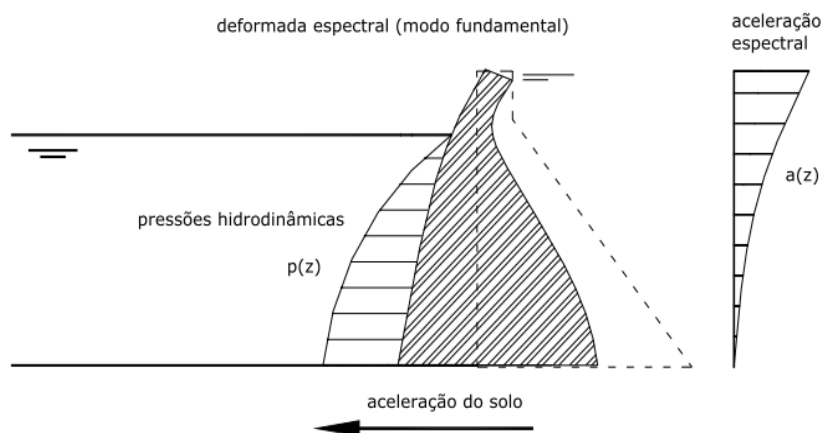


Figura 1 – Resposta Sísmica utilizando o método Pseudo-Dinâmico (Ribeiro, 2006)

1.1 METODOLOGIA

É apresentado de forma detalhada o método de CHOPRA (1978) para obtenção dos parâmetros utilizados no Método Pseudo-Dinâmico (MPD). Esse método consiste na aplicação de uma pressão hidrostática no paramento de montante da barragem (reservatório), um acréscimo de pressões hidrodinâmicas e uma força inercial sentida pela estrutura durante uma aceleração horizontal do solo. A força inercial é obtida através da resposta dinâmica da estrutura no modo fundamental de vibração, este cálculo é descrito detalhadamente no item 1.2.

O perfil de pressão hidrodinâmica descrita no item 1.2.3 é estimada a partir da equação da onda considerando uma fronteira flexível-móvel no paramento de montante da barragem (RIBEIRO et al., 2007). Em seguida, é aplicada a força inercial e a pressão hidrodinâmica através de uma análise estática, que tem como resultado a resposta dinâmica da estrutura.

O deslocamento da estrutura obtido na simulação estática utilizando o Método Pseudo-Dinâmico é comparado com a análise espectro de resposta realizado no software Ansys com o objetivo de calibrar os parâmetros. Na sequência, são inseridos os carregamentos estáticos (reservatório, subpressão e peso próprio) e dinâmicos (força inercial e pressão hidrodinâmica) com a finalidade de obter o deslocamento e as concentrações de tensões na estrutura.

1.2 DETERMINAÇÃO DA FORÇA INERCIAL

A força inercial sentida pela estrutura, devido à aceleração do solo, varia de acordo com a altura da barragem. A equação que descreve a força inercial depende de vários fatores como: período fundamental de vibração, deformada universal da barragem, pressão hidrodinâmica do reservatório e do peso próprio da estrutura na altura analisada (RIBEIRO, 2006).

1.2.1 PERÍODO FUNDAMENTAL DE VIBRAÇÃO

Todo corpo capaz de vibrar possui uma frequência natural ou de ressonância definida pelas propriedades físicas e geométricas do material. Para critérios preliminares de projeto de barragens, o período fundamental de vibração, associado a frequência natural, pode ser estimado sem ou com reservatório.

O período fundamental de vibração da barragem sem reservatório pode ser estimado através da Eq. (1).

$$T_s = 0,01206 * \frac{H_B}{\sqrt{E}} \quad (1)$$

Onde T_s é período fundamental de vibração da barragem sem reservatório (s); H_B é a altura total da barragem (m) e E é o módulo de elasticidade dinâmico do concreto igual a 41,4 GPa.

O período fundamental de vibração da barragem com reservatório é estimado através da Eq.(2).

$$T_{SR} = R_1 * T_S \quad (2)$$

Onde T_{SR} é o período fundamental de Vibração da barragem com reservatório (s); R_1 é o fator de correção para incluir os efeitos do reservatório, este pode ser estimado utilizando o ábaco da Figura 2, através do módulo de elasticidade do concreto (E) e a relação entre a altura do reservatório e a altura total da barragem $\left(\frac{H_R}{H_B}\right)$.

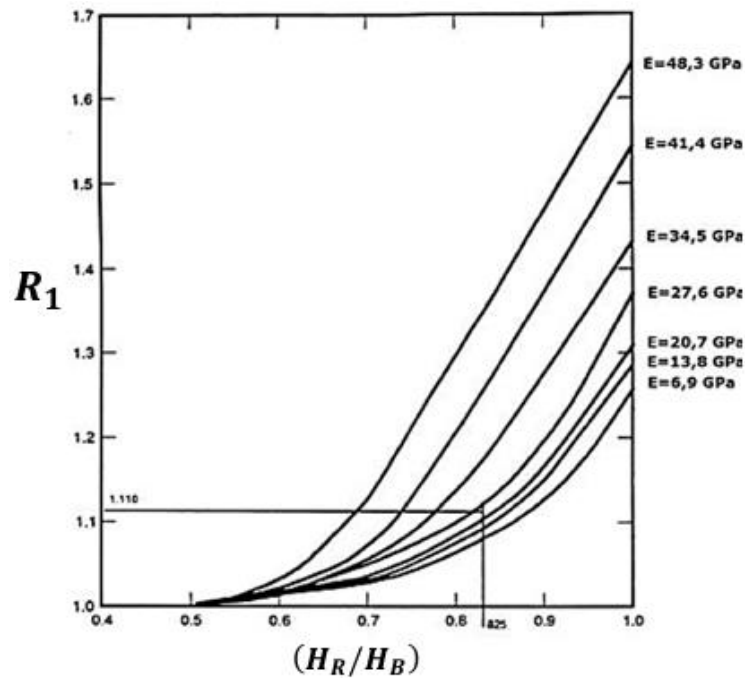


Figura 2. Gráfico para obtenção do fator R_1 .

1.2.2 Deformada Universal

A deformada universal é resultado de diversas análises realizadas por CHOPRA (1978), utilizando o método de elementos finitos (MEF) com diferentes perfis de barragens trapezoidais. A partir dos resultados obtidos foi proposto uma deformada universal (Ψ) que representa a deformação de uma barragem no período fundamental de vibração. A Eq.(3) descreve a forma modal (Ψ) em função da altura relativa da barragem.

$$\Psi\left(\frac{y}{H_B}\right) = 1,2877 * \left(\frac{y}{H_B}\right)^4 - 1,2551 * \left(\frac{y}{H_B}\right)^3 + 0,7914 * \left(\frac{y}{H_B}\right)^2 + 0,1718 * \left(\frac{y}{H_B}\right) \quad (3)$$

Onde Ψ é a deformada da barragem em função da altura; y é a altura analisada em função da base da barragem; H_B é a altura total da barragem.

1.2.3 PRESSÃO HIDRODINÂMICA

A água é considerada compressível e a sua interação com a parede de montante da barragem é influenciada pelo estado vibracional desta, que neste método é representado pelo período fundamental de vibração da estrutura (T_{SR}). O campo de pressão hidrodinâmica do reservatório varia em função da altura do reservatório (H_R), velocidade de propagação do som na água (C) e o estado vibracional da barragem (T_{SR}), conforme a Eq. (4).

$$R_2 = \frac{1}{T_{SR}} * \frac{4H_R}{C} \quad (4)$$

O valor R_2 determina a curva de pressão hidrodinâmica através da Figura 3. Após definir a curva ($R_2 = 0,70 \sim 0,99$), é possível definir a pressão hidrodinâmica (abscissa) para cada altura do reservatório em relação à base (ordenada).

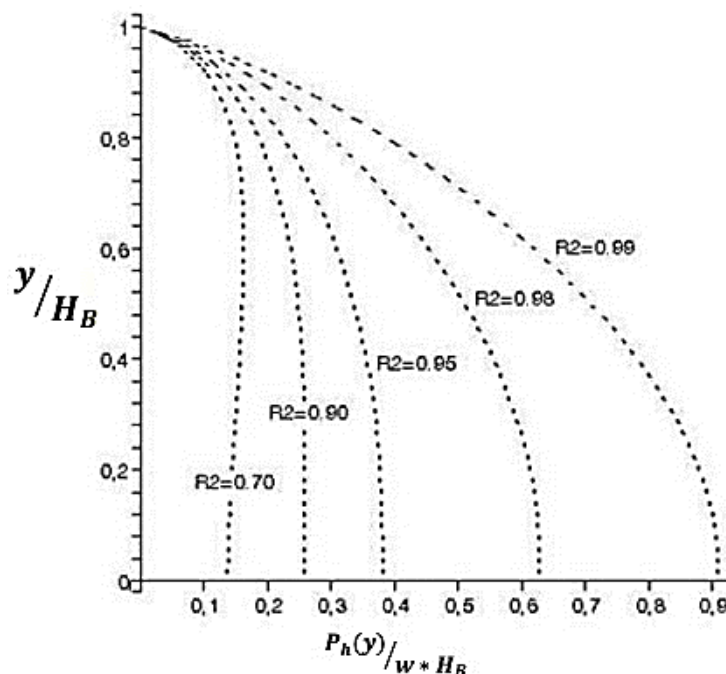


Figura 3 – Campo de pressão hidrodinâmica determinado a partir do valor R_2 .

Sendo y a altura analisada (m); H_B a altura do reservatório (m); $P_h(y)$ é a pressão Hidrodinâmica (KN/m^2) e w é o peso específico da água (KN).

O campo de pressão hidrodinâmica foi elaborado considerando que a altura do reservatório está na altura da crista da barragem. Por questões de segurança, o nível do reservatório se encontra abaixo do nível da crista. Esse desnível é chamado de soleira livre. Para esse caso, recomenda-se que se multiplique o valor da pressão hidrodinâmica por um

fator de correção, igual ao quadrado da altura do reservatório dividido pela altura da barragem $\left(\frac{H_R}{H_B}\right)^2$ (RIBEIRO, 2007).

1.2.4 COEFICIENTE SÍSMICO

A Eletrobrás (2003), recomenda para estudos sísmicos em barragens, uma aceleração horizontal de 0,05g. O espectro de resposta usado neste trabalho, ilustrado na Figura 4, se adequa em regiões de solo firme na Califórnia. O gráfico relaciona a aceleração máxima do solo (PGA) com o período fundamental. Para aplicação do espectro é realizado um ajuste usando um fator de escala igual a 0,166, de modo que a aceleração espectral no tempo zero passa de 0,3 para 0,05g, e a aceleração máxima espectral de pico passa de 0,5g para 0,0835g.

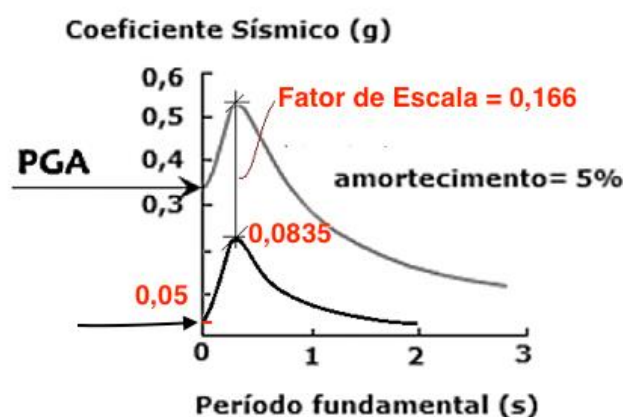


Figura 4 – Espectro de resposta sísmica

1.2.5 PESO DA ESTRUTURA POR UNIDADE DE ALTURA ANALISADA

Para se determinar o peso da estrutura por unidade de altura, realizou-se a discretização da barragem de acordo com a precisão desejada. Neste trabalho, optou-se em discretizar a barragem em fatias horizontais com altura unitária, para estimar a força inercial a cada metro de altura.

1.2.6 FORÇA INERCIAL (CARREGAMENTO SÍSMICO)

A força inercial a qual a barragem é submetida devido à aceleração do solo, incluindo efeitos hidrodinâmicos pode ser estimada através da Eq. (5).

$$f(y) = 4 * \frac{S_a(T_{SR})}{g} * [w_s(y) * \psi(y) + P_h(y)] \quad (5)$$

Quando não se considera os efeitos hidrodinâmicos, ou seja, sem reservatório, o carregamento sísmico passa a ser representado pela Eq. (6)

$$f_y = 3 * \frac{S_a(T_{SR})}{g} * [w_s(y) * \psi(y)] \quad (6)$$

Onde $f(y)$ é força inercial (KPa); y é a altura da barragem em relação a base; $S_a(T_{SR})$ é o Coeficiente sísmico, obtido através da aceleração espectral; $w_s(y)$ é o peso da barragem por unidade de altura (KN); $\psi(y)$ é a deformada universal (-); $P_h(y)$ é a pressão hidrodinâmica unitária, obtida através do gráfico da Figura 3 e g é a aceleração gravitacional igual a $9,8061 \text{ m/s}^2$.

1.3 ANÁLISE ESPECTRO DE RESPOSTA

Uma análise de resposta espectral é utilizada em análises históricas para determinar a resposta da estrutura quando submetida a uma condição de carregamento que varia no tempo, como por exemplo terremotos.

Os dados de entrada utilizados em uma análise espectro de resposta é um gráfico do valor espectral versus a frequência que captura a intensidade das cargas históricas (ANSYS, 2016).

O software Ansys utiliza o método da Raiz quadrada da soma dos quadrados (Square Root of the Sum of the Square – SRSS). Para modos com frequências suficientemente separadas, a raiz quadrada da soma dos quadrados é aproximadamente o valor máximo da resposta da estrutura. Caso o modelo apresente várias frequências naturais muito próximas umas das outras, outro método deve ser adotado. A Figura 5 mostra um exemplo de espectro de frequência suficientemente espaçado onde se pode utilizar o método SRSS.

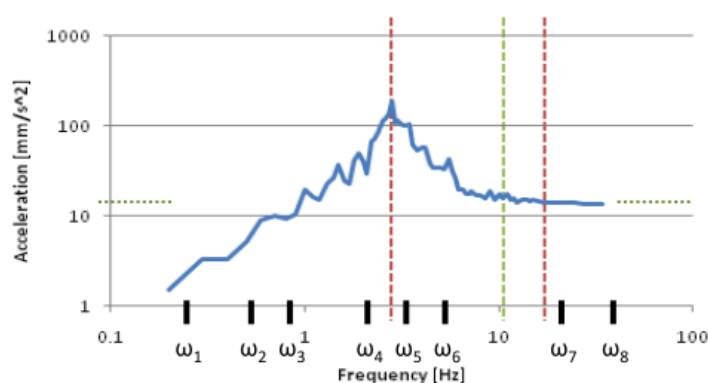


Figura 5 – Espectro de frequência com modos suficientemente espaçados (Fonte: ANSYS, 2016)

Neste estudo, considerou-se somente a primeira frequência natural do modelo na análise de resposta espectral para se realizar a comparação com o método Pseudo-Dinâmico.

2 ESTUDO DE CASO VIA ANSYS NA BARRAGEM DE CONTRAFORTES DA CENTRAL HIDRELÉTRICA DE ITAIPU

Nesta seção, aplica-se o método Pseudo-Dinâmico numa análise estática de um bloco de Contrafortes da CHI ilustrado na Figura 6. Posteriormente os resultados são comparados com uma análise de Espectro de Resposta utilizando o software ANSYS. A Figura 6 apresenta a geometria 2D de um bloco de contrafortes da CHI modelado a partir dos projetos arquitetônicos da barragem.

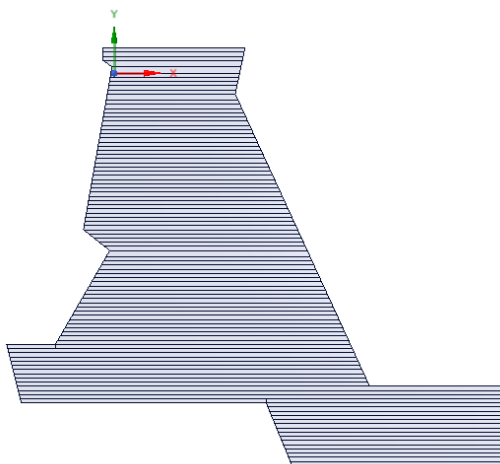


Figura 6 – Perfil do Bloco E6 da Barragem de ITAIPU

2.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

As propriedades dos materiais consideradas na metodologia Pseudo-Dinâmica para a obtenção dos carregamentos dinâmicos são:

- Peso específico da água = $9,821 \text{ KN/m}^3$;
- Peso específico do concreto = 26 KN/m^3 ;
- Módulo de elasticidade dinâmico do concreto = $41,4 \text{ GPa}$.

2.2 MALHA DO MODELO

A malha é formada por elementos PLANE183 bidimensional, com 8 nós ou 6 nós de ordem superior e dois graus de liberdade em cada nó. Tem comportamento de deslocamento quadrático e é adequado para modelar malhas irregulares. O elemento pode ser usado como um elemento plano (tensão do plano, tensão do plano e deformação do plano generalizado).

O modelo matemático bidimensional da barragem de ITAIPU possui 30.126 nós e 6.072 elementos. A Figura 7 apresenta a malha utilizada no modelo.



Figura 7 – Malha de elementos Finitos – Elemento Plane183

2.3 SITUAÇÕES DE CARREGAMENTO

São consideradas duas situações de carregamento: sem e com reservatório. No **1º caso**, considera-se somente a força inercial devido uma aceleração sísmica do solo. Os resultados do primeiro caso são comparados com a análise de resposta espectral. Esse procedimento permite calibrar as condições de carregamento da análise Pseudo-Dinâmica. No **2º caso**, são considerados: peso próprio da barragem, pressão hidrostática e subpressão, referente a 1984; pressão hidrodinâmica e forças inerciais provenientes da aceleração sísmica do solo.

2.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS

Para o cálculo do carregamento sísmico, considerou-se uma aceleração horizontal do solo de 0,05g, através da aceleração espectral apresentada na Figura 4. Utilizou-se o seguinte coeficiente sísmico:

- Coeficiente sísmico ($S_a(T_{SR})) = 0,0835g$

Seguindo a metodologia apresentada, obtém-se:

- Utilizando a Eq.(1), tem-se: $T_s = 0,01206 * \frac{H_s}{\sqrt{E}} = T_s = 0,01206 * \frac{100}{\sqrt{41,4}} = 0,1874 \text{ s};$
- Utilizando a Figura 2, obtém-se: $R_1 = 1,045;$

iii. Utilizando a Eq.(2), obtém-se: $T_{SR} = R_1 * T_S = 1,045 * 0,1874 = 0,1958$ s;

iv. Utilizando a Eq.(4), obtém-se : $R_2 = \frac{1}{T_{SR}} * \frac{4H}{C} = \frac{1}{0,1958} * \frac{4*65,75}{1438,656} = 0,933$.

Optou-se em trabalhar com o perfil de pressão representado pelo $R_2 = 0,95$, por ser o perfil de pressão hidrodinâmica mais próximo do valor R_2 calculado com as características da barragem.

Cálculo da força inercial sem o reservatório (1º caso)

A força inercial aplicada na barragem sem o reservatório é determinada utilizando a Eq.6. A Figura 8, apresenta a variação do carregamento sísmico ao longo da altura da barragem. Os picos apresentados no gráfico são consequência da variação de massa entre as fatias adjacentes.

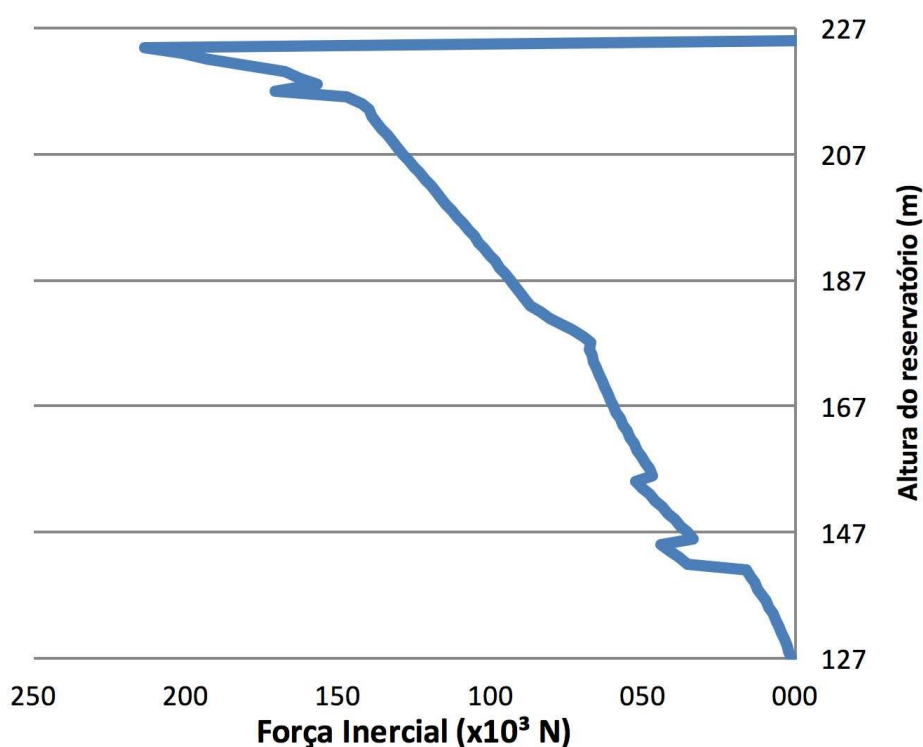


Figura 8– Distribuição do carregamento sísmico ao longo da barragem (sem reservatório)

Na Figura 9, é apresentado o diagrama de carregamento aplicado na estrutura, contemplando todas as informações para a simulação sísmica sem reservatório.

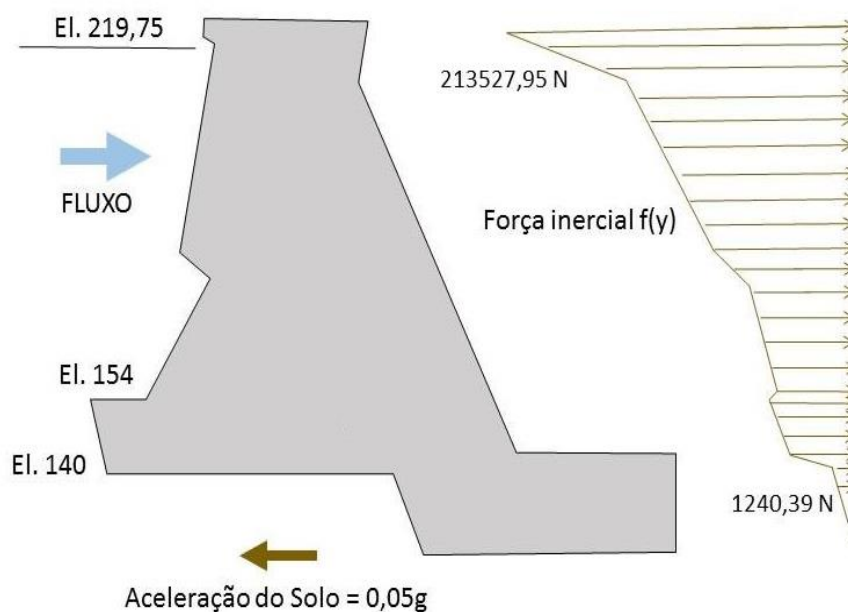


Figura 9– Carregamento inercial aplicado no modelo sem reservatório

2.5 ANÁLISE DE RESPOSTA ESPECTRAL VIA ANSYS SEM RESERVATÓRIO

Para comparação dos resultados, realizou-se uma simulação espectro de resposta com aceleração horizontal de 0,0835g no domínio da frequência, estimada através de uma simulação modal que apresentou o valor de 5,53 Hz. A Figura 10 apresenta a primeira frequência natural e o respectivo modo de vibrar da barragem analisada.

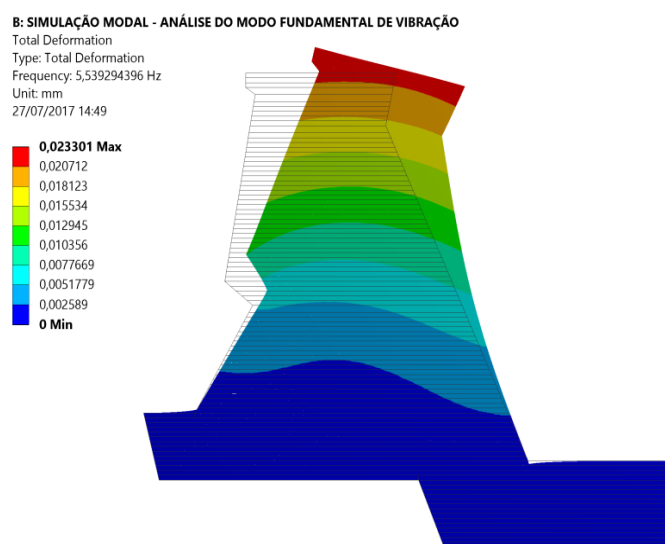


Figura 10– Primeira frequência natural do modelo (sem influência do reservatório)

2.6 CÁLCULO DO CARREGAMENTO COM RESERVATÓRIO

Na Figura 11, observa-se a variação do carregamento sísmico ao longo da altura da barragem com a influência do reservatório. Os picos apresentados no gráfico são consequências da variação geométrica do perfil da barragem e a consequente variação da massa entre as fatias adjacentes, e da influência do reservatório na região azul do gráfico. Pois, da El. 225 a 219,75 e El. 154 a El. 127 é considerado apenas a força inercial da barragem sem a influência do reservatório.

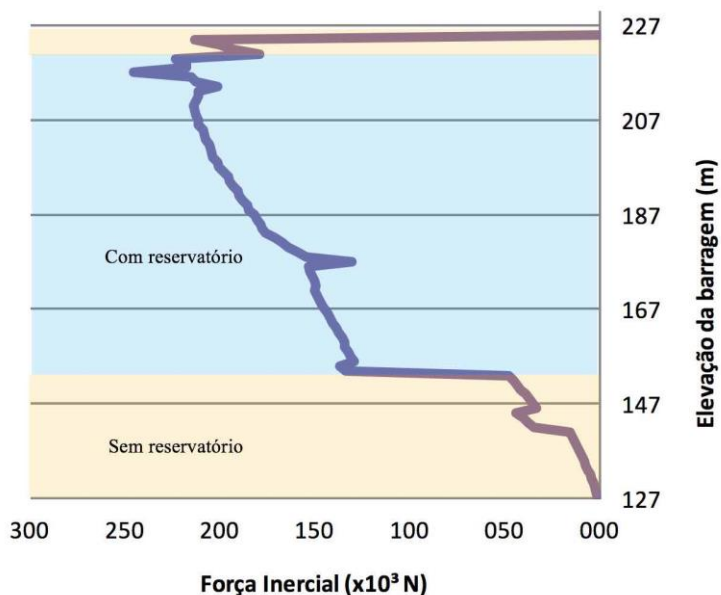


Figura 11– Distribuição do carregamento sísmico ao longo da barragem considerando o reservatório

Na Figura 12 é apresentado perfil de pressão hidrodinâmica obtida através do valor de $R_2 = 0,95$, que determina qual campo de pressão hidrodinâmica utilizar, na Figura 3.

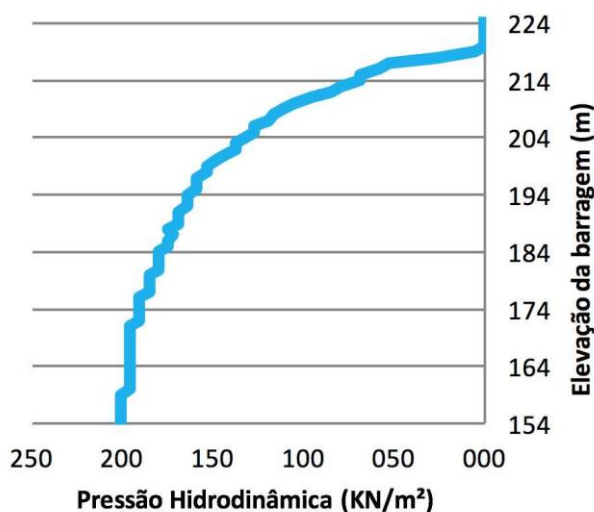


Figura 12– Distribuição de pressão hidrodinâmica

Na Figura 13, é apresentado o diagrama dos carregamentos hidrodinâmicos e inerciais aplicado na estrutura, contemplando todas as informações para a simulação sísmica com reservatório.

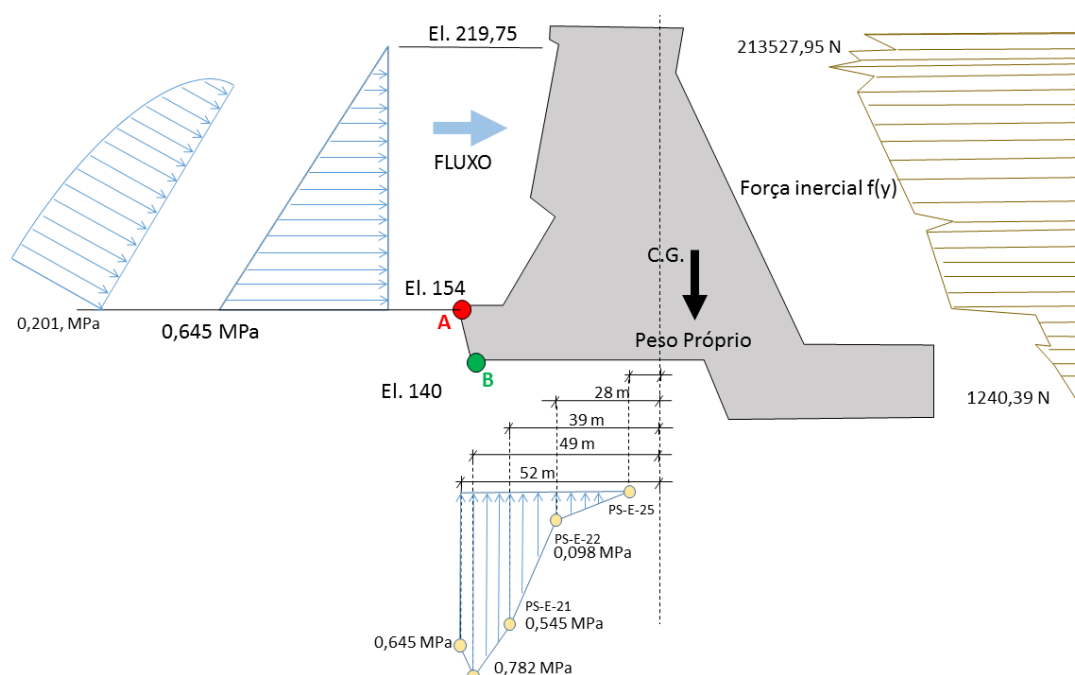
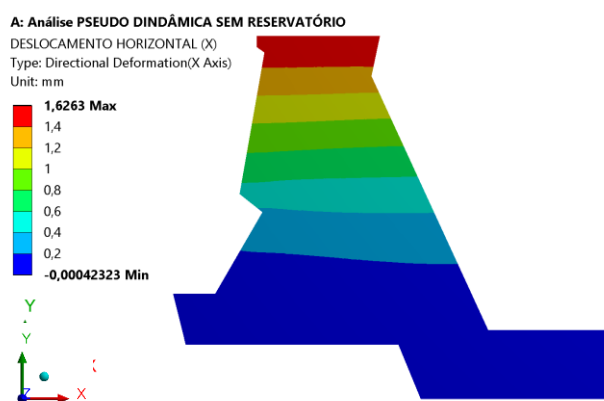


Figura 13– Carregamentos aplicados na barragem

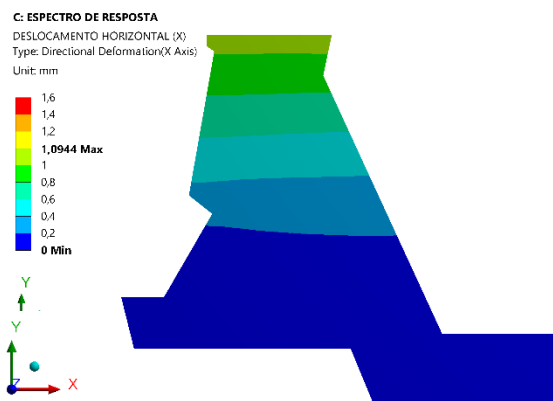
3 RESULTADOS

3.1 MÉTODO PSEUDO-DINÂMICO SEM RESERVATÓRIO E A RESPECTIVA RESPOSTA ESPECTRAL

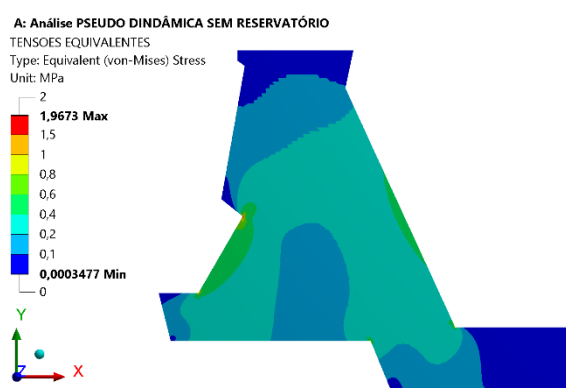
São apresentados os resultados do comportamento da barragem utilizando o Método Pseudo-Dinâmico e a análise espectral realizado com o software Ansys, na condição sem reservatório, admitindo-se a força inercial a qual a barragem é submetida devida uma aceleração sísmica do solo como condição de carregamento. Os efeitos da gravidade e os efeitos hidrodinâmicos são desconsiderados. Os resultados são apresentados em forma de campo de deslocamentos e tensões conforme as Figura 14, Figura 15, Figura 16 e Figura 17.



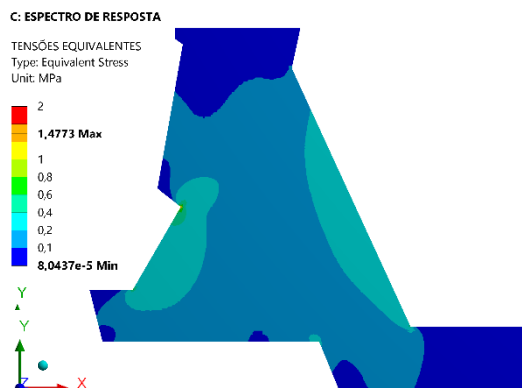
**Figura 14– Campo de deslocamento horizontal (X)
(Método Pseudo-Dinâmico)**



**Figura 15– Campo de deslocamento horizontal (X)
(Resposta Espectral)**



**Figura 16– Tensões equivalente
(Método Pseudo-Dinâmico)**



**Figura 17– Tensões equivalentes
(Resposta Espectral)**

3.2 RESULTADOS DO MÉTODO PSEUDO-DINÂMICO COM RESERVATÓRIO

Os resultados obtidos no método Pseudo-Dinâmico com reservatório (Caso 2) aplicando forças inerciais em função da altura da barragem e pressão hidrodinâmica, considerando condições de carregamentos equivalentes ao ano de 1984 registrados pela instrumentação da barragem são apresentados em forma de campo de deslocamentos e tensões conforme as Figura 18 e Figura 19.

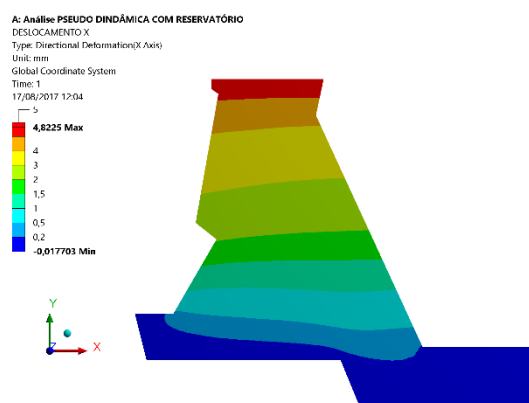


Figura 18– Campo de deslocamento horizontal (X) (Método Pseudo-Dinâmico)

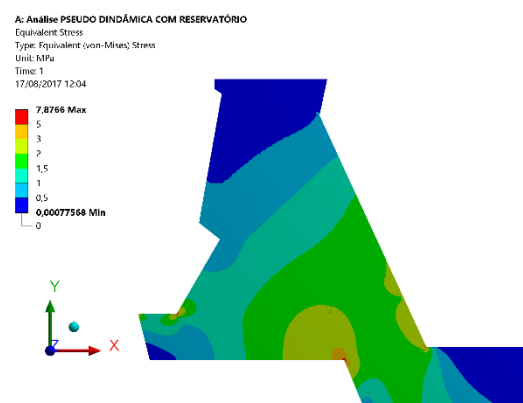


Figura 19– Tensões equivalente (Método Pseudo-Dinâmico)

CONCLUSÕES

Apresentou-se a metodologia para obtenção dos parâmetros de carregamento sísmico de uma barragem baseado no Método Pseudo-Dinâmico. Posteriormente, o método foi aplicado em uma barragem de Contrafortes de Itaipu. Os resultados obtidos foram comparados com uma análise de resposta espectral utilizando o software ANSYS. Inicialmente, realizou-se uma simulação considerando somente a força inercial obtida através do Método Pseudo-Dinâmico, como condição de contorno sem reservatório. Com essa condição, a barragem apresentou um deslocamento horizontal máximo de 1,62 mm na crista e concentrações de tensões máximas na região central das paredes de montante e de jusante de 1,96 Mpa.

O Método Pseudo-Dinâmico considera que a estrutura se encontra em ressonância na sua primeira frequência natural. Dessa forma, realizou-se uma análise modal para se determinar as frequências naturais do modelo. A primeira frequência natural resultante da análise foi de 5,53Hz. Posteriormente, realizou-se uma análise de resposta espectral utilizando como condição de carregamento sísmico uma aceleração de 0,835g para a frequência de 5,53Hz. Nesta análise, a barragem apresentou um deslocamento horizontal da crista de 1,09 mm, e uma concentração de tensão de 1,47 Mpa, na mesma região apresentada nos resultados da simulação utilizando as condições de carregamento sísmico do Método Pseudo-Dinâmico.

Os resultados são considerados satisfatórios. Como esperado, os valores dos resultados do Método Pseudo-Dinâmico são maiores que o da resposta espectral, devido à forma conservadora com que o método foi desenvolvido.

Finalmente, realizou-se uma análise Pseudo-Dinâmica, considerando além dos carregamentos sísmicos do método, carregamentos estáticos e hidrostáticos da estrutura referente a 1984. Nessa análise, a barragem apresentou um deslocamento horizontal da crista de 4,82 mm, e uma concentração de tensão de 7,87 Mpa na base da parede de montante na El. 154 e no contato entre a barragem e a fundação, próximo ao eixo central, na El 140 demonstrando um comportamento estrutural eficiente da barragem.

A aproximação entre os resultados das análises Pseudo-Dinâmica e de resposta espectral, mostra que o método é eficiente e pode ser utilizado para análises sísmicas em barragens com baixo custo computacional e em pouco tempo. Os resultados demonstram que o método pseudo-dinâmico é mais conservador que a análise de resposta espectral, o que contribui para a segurança da barragem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ITAIPU BINACIONAL e ao CEASB (Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragem) pelos recursos recebidos nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ASSUMPÇÃO, M. et al. Intraplate stress field in South America from earthquake focal mechanisms. *Journal of South American Earth Sciences*. v. 71. 2016.
- ANSYS. Module 06: Response Spectrum Analysis ANSYS Mechanical Linear and Nonlinear Dynamics, 2016, pp. 4-6.
- CHOPRA, A.K. (1978) – “Earthquake resistant design of concrete gravity dams.” *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 104, pp. 953-971.
- ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras - SA. Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas. . [S.l: s.n.], 2003.
- ITAIPU BINACIONAL. Aspectos teóricos dos estudos realizados – Estudos para a reavaliação dos valores de controle para a instrumentação civil das estruturas e fundações. 1999. Documento do Arquivo Técnico (SAT). N° 2660.50.15402.P-R0, Foz do Iguaçu, 1999.
- ITAIPU BINACIONAL. Bloco de contraforte E-6 – Estudos para a reavaliação dos valores limites para a instrumentação civil das estruturas e fundações. 1999. Documento do Arquivo Técnico (SAT). N° 2662.50.15401.P-R0, Foz do Iguaçu, 1999.
- ITAIPU BINACIONAL. Especificação técnica de consultoria para análise estrutural da barragem de contrafortes, Trecho E, da barragem de ITAIPU. 2014. Documento do Arquivo Técnico (SAT). N° 8012.20.15225.P-R0, Foz do Iguaçu, 2014.
- PEDROSO, L. J. (2002) - "Barragens de concreto: aspectos gerais e fundamentos do cálculo de tensões e da estabilidade baseado no Método da Gravidade." Apostila do mini-curso de extensão da Semana de Engenharia Civil. Brasília: Universidade de Brasília.
- PEDROSO, L.J. & SILVA, S.F. (2005) – “Avaliação Preliminar da Segurança Sísmica de um Perfil Típico em Barragem de Concreto Gravidade. “ XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Goiânia-GO.
- RIBEIRO, P.M. (2006) – “Uma metodologia analítica para a avaliação do campo de tensões em barragens de concreto durante terremotos. “ Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, pp. 71 – 76.
- RIBEIRO, P.M. & MELO, C. A. (2007) – “Uma aplicação de referência do método pseudo-dinâmico para a Análise sísmica de barragens de concreto gravidade. ” XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belém-PA.
- SILVA, S.F. & RIBEIRO, P. M. (2007) – “Uma modificação ao método do coeficiente sísmico incluindo os efeitos de compressibilidade do fluido. ” XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belém-PA.
- USBR (United States Bureau of Reclamation), (1976) – “Design of gravity dams. ” United States Department of the Interior – Bureau of Reclamation.
- WESTERGAARD, H.M. Water pressures on dams during earthquakes. *Trans. ASCE*, v. 58, n. 6, p. 605–42, Jun 1933.