

Capítulo 162

Efeito sísmicos em barragens

Capítulo 162- Efeito sísmicos em barragens

162.1 Introdução

Quando estudava engenharia civil na EPUSP nada aprendi sobre os efeitos sísmicos, pois, conforme todos diziam: não temos terremotos em nosso país.

Os anos foram se passando e começamos a ver nos jornais, eventos sísmicos de magnitude 1 a 3 em vários locais do Brasil.

O objetivo deste capítulo é mostrar como levar em conta tais eventos sísmicos nos cálculos de barragem e de paredes de concreto para contenção de água.

Existe uma norma da ABNT NBR 15421/ 2006 que trata de Projeto de estruturas resistentes a sismos- procedimento. Não cita especificamente barramentos, mas os mesmos podem ser inclusos no termo “obras hidráulicas”.

O livro do geólogo José Alberto Vivas Veloso denominado “Tremeu a Europa e o Brasil também” lançado em 2015, mostrou que o terremoto de Lisboa de 1755 atingiu até a costa de Pernambuco matando duas pessoas.

Veloso também fala de um terremoto a 30km de Manaus datado de 1669 que foi estimado com grau 7 na data de fundação da cidade e felizmente só havia choupanas.

Na Figura (162.1) está o mapa da aceleração horizontal no Brasil conforme ABNT.

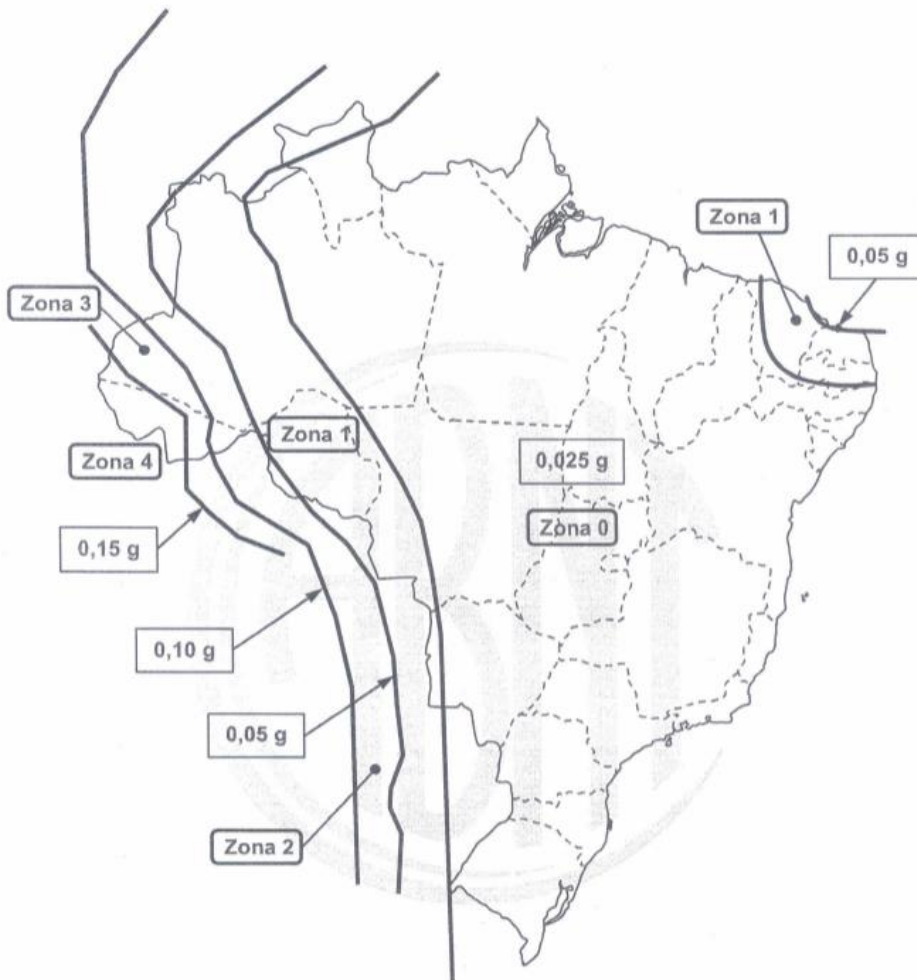


Figura 1 — Mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil para terrenos da classe B ("Rocha")

Para estruturas localizadas nas zonas sísmicas 1 a 3, os valores a serem considerados para a_g podem ser obtidos por interpolação nas curvas da figura 6.1. Um estudo sísmológico e geológico específico para a definição de a_g pode ser opcionalmente efetuado para o projeto de qualquer estrutura.

6.2 Definição da classe do terreno

O terreno de fundação deve ser categorizado em uma das classes definidas na tabela 2, associadas aos valores numéricos dos parâmetros geotécnicos médios avaliados nos 30 m superiores do terreno.

162.2 Teoria

C.N. Zangar em 1952 fez um estudo para o *Bureau of Reclamation* chamado *Hydrodynamic pressures on Dams due to horizontal Earthquake effects*.

Neste estudo foi deduzida a equação:

$$P_e = C \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot H$$

Sendo:

P_e = pressão horizontal na altura h (kN/m²)

C = coeficiente de distribuição das pressões (kN/m³)

α = intensidade horizontal do terremoto = a/g (adimensional)

a = aceleração devida ao terremoto

g = aceleração de gravidade = 9,81(m/s²)

γ = peso específico da água (kN/m³)

H = altura da barragem (m)

Nota: o braço para cálculo do momento é 0,4H.

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma = \rho \cdot g = 1000 \times 9,81 = 9810 \text{ N/m}^3 = 9,81 \text{ kN/m}^3$$

Pressão estática da água

$$p = \gamma \cdot h$$

$$F = \gamma \cdot h^2 / 2$$

Sendo:

P = pressão hidrostática da água (kN/m²)

F = força total horizontal da água na parede vertical (kN)

Peso específico do concreto: 23,50 kN/m³

Pedras (*masonry*) = 22,5 kN/m³

Nota: o braço para o cálculo do momento das forças estáticas é 0,5H.

Uma barragem de concreto ou terra possui um período de vibração variando de 0,08s a 1,00s, sendo comumente adotado 0,2s.

Uma maneira de se obter o valor de C para um barramento de concreto com parede vertical de montante:

$$C = 0,9 / (1 - 7 (H/1000T)^2)^{0,5}$$

$$\text{Índia, 2004 } C = 8,0143 / (1 - 0,72 (H/304,8.T)^2)^{0,5}$$

Sendo:

H = altura do barramento (m)

T = período de frequência do terremoto no período em segundos = 0,2 s

C = fator kN/m³. Caso não tenhamos este dado adotar $C = 8,2$ kN/m³ (Índia, 2004)

162.3 Análise pseudo-estática

A intensidade aceleração do efeito sísmico α_h (horizontal) e α_v (vertical). Portanto, temos forças horizontais e forças verticais, A análise pseudo-estática é a combinação dos efeitos do reservatório de água com o os efeitos sísmicos.

As forças de inercia na barragem conforme Novak et al, 2010 são:

Forças horizontais $P_{mh} = \pm \alpha_h \cdot P_m$

Forças verticais $P_{mv} = \pm \alpha_v \cdot P_m$

Sendo:

P_{mh} = força horizontal

P_{mv} = força vertical

P_m = força de inercia da barragem sozinha

Em qualquer profundidade z_1 abaixo do nível da superfície da água, a pressão hidrodinâmica obedece as análises de Westgaard, 1933 in Novak et al, 2010.

$$P_{wh} = C_e \cdot \alpha_h \cdot \gamma \cdot z_{max}$$

Sendo:

P_{wh} = pressão em KN/m²

γ = peso específico da água =9,81 kN/m³

z_{max} = máxima profundidade da água na seção considerada (m)

α_h = aceleração horizontal

C_e = fator sísmico de pressão fornecido pela Tabela (162.1) e depende da profundidade e do ângulo Φ de inclinação da parede a montante da barragem de concreto.

O valor de α varia de 0,03 a 0,1 para as forças horizontais, sendo menor as forças verticais. Na Índia, 2004 se usa $\alpha = 0,15$, que é um valor bem alto.

Tabela 162.1- Fatores sísmicos de pressão C_e

Razão z_1/z_{max}	Fator sísmico de pressão C_e	
	Ângulo $\Phi = 0^\circ$	Ângulo $\Phi = 15^\circ$
0,2	0,35	0,29
0,4	0,53	0,45
0,6	0,64	0,55
0,8	0,71	0,61
1,00	0,73	0,63

A resultante das cargas hidrodinâmicas é dada pela equação conforme Novak:

$$P_{ewh} = 0,66 C_e \cdot \alpha_h \cdot z_1 \cdot \gamma \cdot (z_1/z_{max})^{0,5}$$

Esta força resultante age na altura $0,4z_1$ e tal força chega em algumas vezes a 50% de aumento das cargas inerciais.

As forças de pressão freáticas permanecem inalteradas com os efeitos sísmicos.

Equilíbrio na barragem de concreto

A somatória das forças horizontais ΣH na barragem de concreto assim como a somatória das forças verticais ΣV deverá ser zero.

A somatória dos momentos ΣM aplicados na barragem também deverá ser zero.

$$\begin{aligned}\Sigma H &= \Sigma V = 0 \\ \Sigma M &= 0\end{aligned}$$

162.4 Força de terremoto conforme Linsley and Franzini, 1992

Conforme Linsley e Franzini, 1992 nas regiões onde existe terremoto a aceleração horizontal no barramento varia de $0,5g$ a $1,0g$.

Von Karman sugeriu a seguinte equação para calcular os esforços horizontais do terremoto nas unidades Inglesas:

$$E_w = 0,555 \cdot K \cdot \gamma \cdot H^2$$

Sendo:

E_w = força horizontal devido ao terremoto (kN)

K = é a razão entre a aceleração causada pelo terremoto pela aceleração da gravidade. Exemplo: $K=0,05$ $g/g=0,05$ (Valor muito baixo)

H = altura do barramento (m)

γ = peso específico da água = $9,81$ kN/m³

A força E_w age a uma distância do fundo igual a $4h/3 \cdot \pi = 0,424 h$.

Linsley e Franzini, 1992 comentam que as propostas de Zangar e Westergaard e informa que os resultados são comparáveis.

Valor de E_w conforme Westergaard.

$$E_w = 0,543 \cdot K \cdot \gamma \cdot H^2$$

Há uma diferença somente de 2% entre as fórmulas, o que é desprezível.

162.4 Bibliografia e livros consultados

- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). NBR 15421/06. *Projeto de estruturas resistentes a sismos-procimentos*.
- BUREAU OF INDIAN STANDARDS. *Criteria for structural design of spillway training walls and divide walls*. Outubro de 2004, 7 páginas.
- FEMA COASTAL AREAS. *Building on Strong and safe foundations*. Recommended residential construction for coastal areas. 31 páginas.
- FEMA *Federal guidelines for dam safety*. Maio 2005, 60 páginas.
- LING,FERRY. *Seismic analysis of basement wall structure with pseudo-static and dynamic method*. Jakarta, 10 páginas.
- NOVAK, P. et al. *Hydraulic structures*. 4ª edição 2010. 700 páginas.
- VELOSO, JOSÉ ALBERTO VIVAS. *Tremeu a Europa e o Brasil também*. Chiado Editora, Portugal, 2015, 412 páginas.
- ZANGAR,C.N, *Hydrodynamic pressures on dams due to horizontal earthquake effects*, Colorado, ano 1952, 15 páginas.