



UM ESTUDO DO CAMPO DE TENSÕES EM UM PERFIL TÍPICO DE BARRAGEM DE CONCRETO PELO MÉTODO GRAVIDADE

Jonas Yamashita de Farias

Iarly Vanderlei da Silveira

Lineu José Pedroso

jonasyamashita@gmail.com

iarlysilveira@hotmail.com

lineujs@gmail.com

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Grupo de Dinâmica e Fluido – Estrutura (GD FE). Caixa Postal 04492, Campus Darcy Ribeiro, CEP 70919-970, Brasília – DF.

Resumo. *Vários acidentes de rupturas catastróficas em barragens no Brasil justificam as preocupações que se deve ter em relação à segurança e integridade estrutural dessas obras. Entre os métodos preliminares para avaliação do estado de tensões numa barragem, e também uma estimativa prévia dos fatores de segurança, está o Método Gravidade (MG), o qual vem sendo utilizado há décadas nas análises iniciais para este tipo de estrutura. Uma análise direta utilizando este método é desenvolvida neste trabalho para o cálculo das tensões numa barragem. Para uma condição bidimensional (2D), a formulação fundamentada neste método está implementada no código computacional CADAM (Computation Analysis of Gravity Dams, UM/Poly-Ca), o qual é capaz de tratar diferentes condições geométricas e de carregamento comuns na engenharia de barragens. São apresentados resultados de uma análise de tensões obtidos a partir de um perfil típico de barragem tipo gravidade em concreto, sujeita a diversas situações relevantes ao longo da sua vida útil, dentre as quais: (1) elevação do nível do reservatório à montante; (2) acúmulo de solo erodido e depositado à montante e; (3) ocorrência de sismos. Estes resultados são ainda comparados entre si para evidenciar as diferenças no campo de tensões no interior do maciço da barragem, quando estas diversas solicitações atuam separadas ou em conjunto, fornecendo indicadores importantes sobre o comportamento da estrutura, os limites de funcionamento da mesma e as suas zonas críticas.*

Palavras-Chave: *Barragens de Concreto, Método Gravidade, Análise de Tensões, Segurança de Barragens, Sismicidade*

1 INTRODUÇÃO

As barragens possuem um papel econômico importante, mas ao mesmo tempo um elevado potencial de riscos em decorrência da possível ruptura, o que impõe análises e fiscalizações mais rigorosas antes, durante e depois da execução da obra. Os reparos em barragens possuem um altíssimo grau de complexidade e custo, o que reforça a importância do estudo prévio nesse tipo de obra. Dentre as análises preliminares ressalta-se o estudo das distribuições de tensões em barragens de concreto gravidade, uma abordagem fornecida pelo Método Gravidade (MG), proposta pela United States Bureau of Reclamation (1976), o qual representa uma alternativa eficiente, consistente e pouco custosa, tanto economicamente quanto computacionalmente, para a análise preliminar desse tipo de problema.

Este trabalho é resultado de pesquisas desenvolvidas no Grupo de Dinâmica e Fluido-Estrutura (GDFE) da Unb para o tratamento de problemas relacionados à engenharia de Barragens, tais como: Pedroso (2002), Ribeiro et al. (2007) e Nascimento Junior (2016).

2 FORMULAÇÃO TEÓRICA

2.1 Cargas atuantes

Neste trabalho são consideradas as cargas mais comuns durante a vida útil da obra, atuando no corpo da barragem e como essas afetam as tensões internas nessa estrutura, predominando o peso próprio e as forças hidrostáticas a montante e a jusante da barragem, e esforços menos frequente como a influência do assoreamento do reservatório e a presença de sismos na barragem.

2.2 Método Gravidade

O “Método Gravidade para análise de tensões e estabilidade” foi desenvolvido pela United States Bureau of Reclamation (1976) e trata-se de um método analítico que proporciona de forma aproximada determinar as tensões nas seções transversais de uma barragem de concreto gravidade.

O uso do MG requer algumas simplificações relativas ao comportamento estrutural da barragem e a aplicação das cargas, e são baseadas nas hipóteses de uma distribuição linear de tensões normais verticais, em uma distribuição parabólica de tensões cisalhantes e uma distribuição polinomial de grau 3 de tensões normais horizontais. As equações 1, 2 e 3 definem a variação dessas tensões ao longo de uma seção transversal qualquer (Ribeiro, 2006).

$$\sigma_z(y) = a + b \cdot y \quad (1)$$

$$\tau_{zy}(y) = a_1 + b_1 \cdot y + c_1 \cdot y^2 \quad (2)$$

$$\sigma_y(y) = a_2 + b_2 \cdot y + c_2 \cdot y^2 + d_2 \cdot y^3 \quad (3)$$

2.3 Aspectos Computacionais

A ferramental utilizada, CADAM, foi desenvolvida na École Polytechnique de Montréal com o intuito de desenvolver o estudo da segurança de barragens de concreto. Inicialmente o CADAM proporcionou um suporte para o conhecimento dos princípios de avaliação dessas estruturas. O tratamento de dados é baseado no MG da USBR (1976) que executa análises de

estabilidade para cargas hidrostáticas e sísmicas, possuindo várias opções de modelagem e de saída para os resultados das análises.

3 ESTUDO DE CASO

Nessa etapa realiza-se uma série de análise de tensões em uma barragem de concreto, cuja geometria (Figura 1) é conhecida como barragem de Tinawi. A partir desse perfil variam-se forças individualmente, como (1) elevação do nível do reservatório à montante; (2) acúmulo de solo erodido e depositado à montante e; (3) ocorrência de sismos, com o intuito de entender como cada uma delas afeta globalmente o sistema. As propriedades específicas dos materiais adotadas para análise são apresentadas na Tabela 1.

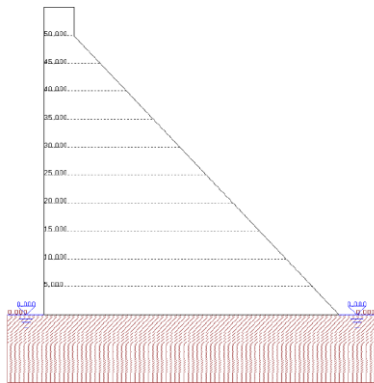


Figura 1. Geometria do perfil analisado

Fonte: CADAM (Lecler et al., 2001)

3.1 Influência do nível d'água

Os valores da tensão vertical σ_z foram calculados para cada junta da barragem (de 5 em 5 m), para as alturas do reservatório de 10, 30 e 50 metros. Os valores calculados apresentados na Tabela 1 mostram uma diminuição nas tensões a montante à medida que eleva a cota do reservatório, e inversamente a jusante ocorre acréscimos nas tensões. Para este estudo não analisou as tensões σ_y e τ_{zy} .

Tabela 1. Tensão vertical no corpo da barragem para as alturas do reservatório 10, 30 e 50 m

Joint		Normal stresses		Normal stresses		Normal stresses	
ID	U/S elevation (m)	Upstream (kPa)	Downstream (kPa)	Upstream (kPa)	Downstream (kPa)	Upstream (kPa)	Downstream (kPa)
1	50,000	-117,720	-117,720	-117,720	-117,720	-117,720	-117,720
2	45,000	-297,072	-6,522	-297,072	-6,522	-283,485	-20,109
3	40,000	-412,826	0,000	-412,826	0,000	-362,570	-41,042
4	35,000	-524,569	0,000	-524,569	0,000	-427,541	-84,700
5	30,000	-636,912	0,000	-636,912	0,000	-488,312	-136,116
6	25,000	-750,288	0,000	-748,617	0,000	-547,414	-191,011
7	20,000	-864,533	0,000	-854,813	0,000	-605,729	-247,741
8	15,000	-979,444	0,000	-954,484	-14,690	-663,627	-305,548
9	10,000	-1094,858	-0,001	-1048,088	-37,232	-721,283	-364,038
10	5,000	-1210,057	0,000	-1136,553	-65,226	-778,792	-422,987
11	Base joint	-1322,795	0,000	-1220,756	-97,708	-836,204	-482,260

3.2 Influência de depósito à montante

Nessa etapa simulou-se o reservatório no seu volume morto e assoreado, ou seja, preenchido por solo, que gera um empuxo adicional sobre a face de montante. Compararam-se as tensões verticais na barragem para a situação com o reservatório cheio (50 m), com e sem a presença de 5 metros de solo siltoso. Os resultados são mostrados nas Figuras 2 e 3, nas quais percebe-se uma variação linear na forma de trapézio, para diversos níveis de juntas horizontais no interior da barragem e para o caso assoreado ocorre um pequeno acréscimo de tensões na base abaixo da cota do solo acumulado. Para o restante do corpo da barragem não houve alteração.

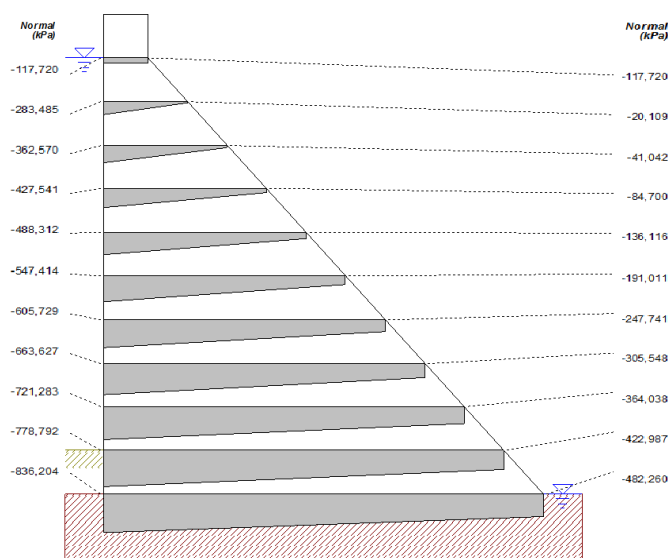


Figura 2. Tensões verticais σ_x sem a camada siltosa

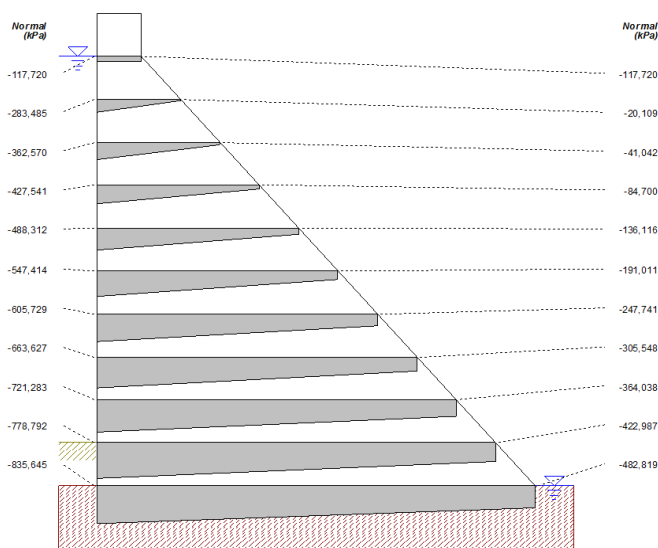


Figura 3. Tensões verticais σ_x com a camada siltosa

3.3 Influência de sismo – Análise pseudo-estática

O método pseudo-estático de análise simplifica a realidade sísmica do problema ao desconsiderar o comportamento elástico da barragem e considerá-la um corpo rígido. Esse método também é conhecido como método do coeficiente sísmico. Essa solução, foi

desenvolvida analiticamente por Westergard (1933) através da resolução da equação de Laplace. Percebeu assim que o sismo gerava um acréscimo parabólico na carga hidrodinâmica na interface fluido-estrutura.

Para considerar a influência do sismo, compara-se inicialmente o acréscimo de tensão gerado por um terremoto com coeficiente sísmico de $0,2g$ ($1,962 \text{ m/s}^2$) em relação ao caso do reservatório cheio isolando assim o fenômeno sísmico. O efeito da força sísmica sobre a tensão principal maior é apresentado na Figura 4 e nas Figuras 5 e 6 mostram-se como variam as forças resultantes na base de cada sub-seção devido à presença do sismo.

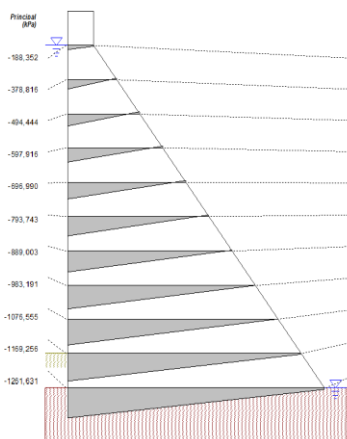


Figura 4. Tensões principais na barragem com sismo

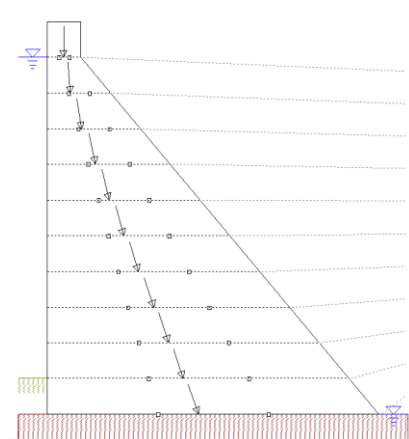


Figura 5. Forças resultantes na barragem (sem sismos)

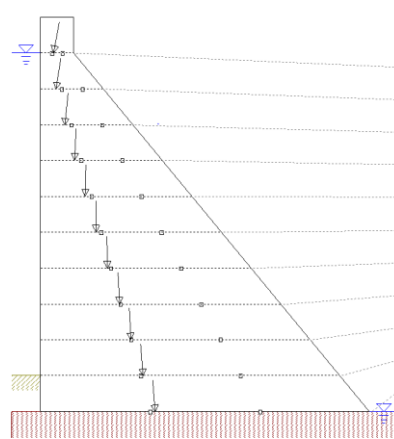


Figura 6. Forças resultantes na barragem (com sismos)

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse estudo pode-se inferir, a partir das análises realizadas que:

- Em relação ao nível d'água, a tensão vertical no nível mais baixo analisado (10 m) correspondente basicamente ao peso do concreto acima do ponto considerado, comportando-se de forma praticamente linear na face de montante, atingindo um valor máximo da ordem de 1.300 kPa na base, já na face de jusante as tensões verticais são muito baixas (menores que 10 kPa) e praticamente constantes. Ao subir o nível d'água observou-se uma compensação na tensão σ_z com um alívio à montante e acréscimo à jusante do sistema, atingindo valores da ordem de 836 kPa e 482 kPa , respectivamente, quando o nível da água atinge o seu máximo de 50m . Isso acontece porque a força hidrostática tende a rotacionar a barragem em torno do seu "pé", compensando assim um pouco do enorme peso de concreto concentrado mais à montante do sistema.

- Quanto à presença do nível de solo acumulado à montante, percebe-se que não há mudanças significativas nas tensões verticais atuantes, assim como alterações significativas nos fatores de estabilidade da barragem.

- Quanto à consideração de esforços horizontais adicionais devido ao sismo, percebe-se uma mudança na direção e ponto de aplicação das forças resultantes na base da barragem, aumentando a sua excentricidade, gerando um acréscimo nas tensões no pé de montante para cerca de 1261 kPa e um alívio no pé à jusante para cerca de 102 kPa , ainda em compressão (ver Figura 6). O valor de compressão máxima à montante (1261 kPa), considerando a presença do sismo, ainda está bem aquém da resistência do concreto (30.000 kPa). Nota-se ainda o surgimento de tensões de tração (positivas) na face de jusante para as seções no terço superior da altura da barragem.

5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados permitem concluir que o MG, tal como implementando no programa CADAM, oferece uma ferramenta simples e eficiente para uma avaliação preliminar dos principais aspectos condicionantes de um projeto de barragem de concreto.

Os resultados preliminares mostram a influência do reservatório de água no sentido de aliviar as tensões de compressão no pé da barragem à montante, ao mesmo tempo que aumenta em compensação as tensões de compressão à jusante. A presença de deposição de solo à montante não se mostrou relevante do ponto de vista mecânico. Por outro lado, o sismo considerado afetou o estado de tensão no interior do maciço da barragem, mas não em magnitude suficiente para se mostrar preocupante quanto à resistência do concreto.

6 AGRADECIMENTOS

Ao professor Lineu José Pedroso, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNP) e à Universidade de Brasília (UnB).

7 BIBLIOGRAFIA

- Lecler, M., Léger, P., Tinawi, R. (2001). *CADAM – User's Manual – Version 1.4.3*. École Polytechnique de Montreal, 125 p.
- Nascimento Júnior, C. A. (2016). *Um Estudo Comparativo Analítico-Numérico de Tensões Locais e Globais em Barragens Gravidade de Concreto*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília.
- Pedroso, L. J. (2002). *Barragens de Concreto: aspectos gerais e fundamentos do cálculo de tensões e da estabilidade baseado no método gravidade*. In: Apostila no Curso de Barragens de Concreto na Semana de Engenharia Civil. Brasília: Universidade de Brasília.
- Ribeiro, P.M.V. (2006). *Uma Metodologia Analítica para Avaliação do Campo de Tensões em Barragens Gravidade de Concreto Durante Terremoto*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília.
- Ribeiro, P.M.V., Melo, C.A.E.; Caldas, S. & Pedroso, L. J. (2007). *Análise de tensões em barragens gravidade de concreto devido à ação do peso próprio e da força hidrostática*. In: Anais do XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Belém – PA, Paper T.100 A27; 13p.
- USBR (1976). *Design of Gravity Dams*. United States Bureau of Reclamation, US Government Printing Office.
- Westergaard, H. M. ; *Water pressure on dams during earthquakes*. In : Transactions ASCE, v.98, n. 1835, p. 418-433, 1933.