

Estudo sobre o Cálculo da Probabilidade de Risco por Galgamento em Barragens

Moisés Antônio da Costa Lemos

Engenheiro Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, moisesaclemos@gmail.com

Danielli Miranda Marino

Geóloga, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, marino.geologia@gmail.com

Arthur Duarte Dias

Engenheiro Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, engenho.arthur@gmail.com

RESUMO: O galgamento é um fenômeno dinâmico, provocado principalmente por chuvas acima das previstas em curto período de tempo e podem causar danos financeiros, ambientais e até mesmo a perdas de vidas. Os estudos de prevenção são menos custosos do que os corretivos, portanto, soluções que forneçam o risco associado às estruturas de barragem são largamente utilizadas para minimizar os danos. A probabilidade de risco é uma forma estatística usada para uma pré-avaliação de prevenção de eventuais casos de ruptura das estruturas de barragem. Nesse trabalho é realizado um apanhado geral sobre os efeitos associados ao galgamento em barragens e os cálculos realizados para a probabilidade do risco do mesmo.

PALAVRAS-CHAVE: Galgamento, Probabilidade de Risco, Monte Carlo.

1 INTRODUÇÃO

O galgamento corresponde a elevação do nível d'água do reservatório acima da crista da barragem, provocada principalmente por precipitações pluviométricas maiores do que as estimadas em projeto (Brasil, 2012). Resultando na liberação incontrolável de água do reservatório, carreamento de materiais e ruptura nas barragens de terra ou aumento da sobrecarga em barragens de concreto acarretando também sua ruptura (Silva et al., 2007).

O fenômeno é responsável por 35% das rupturas de barragens, perdendo apenas para o *piping*, 38% (ICOLD 1973). Em barragens de terra, o galgamento promove corte em profundidade do coroamento, resultando em erosão a jusante. Surgindo, desse modo, zonas frágeis que levam a ruptura da barragem. Estima-se que a brecha inicie na zona central da barragem, em razão da maior concentração de escoamento nessa região

e sua dimensão depende do tempo de duração do galgamento, características do aterro e propriedades dos materiais (Jónatas, 2013).

Johnson e Illes (1976) classifica a brecha inicialmente como triangular, aumentando em profundidade com a erosão do material menos resistente até formas trapezoidais, como na Figura 1. Sendo o tamanho da erosão atribuída ao volume de água armazenada e as dimensões do reservatório.

A análise de risco de galgamento pode ser realizada pela relação de ocorrência do galgamento com o tempo de retorno, probabilidade de cada evento envolvido (árvore de falhas) e análise de incertezas das variáveis de entrada, como vazões e velocidade do vento, através de métodos probabilísticos, dentre eles o método Monte Carlo (Lauriano et al., 2017).

2 REVISÃO DE CASOS

A segurança de uma barragem está relacionada a sua capacidade de suportar comportamentos que afetam seus aspectos estruturais, evitando assim, danos econômicos, sociais e ambientais (Silva et al., 2007). Entre os mecanismos causadores de ruptura, a influência do galgamento pode ser obtida por meio da relação entre sua probabilidade de ocorrência e desenvolvimento de erosões que levam a formação de brecha (Saliba, 2009).

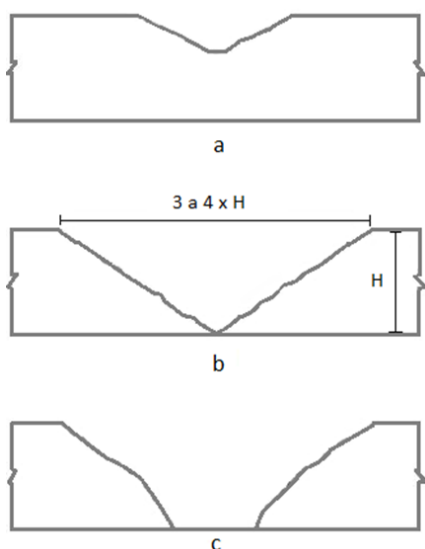


Figura 1. Ruptura causada por galgamento. a) Brecha inicial. b) Brecha intermedrária. c) Ruptura total. (Adaptado de Johnson e Illes, 1976).

No Brasil, entre os acidentes envolvendo galgamento, destacam-se nas barragens de Orós (1960), Euclides da Cunha e Limoeiro (1977). Entretanto, a ocorrência de galgamento não culmina obrigatoriamente na ruptura de barragens, como no caso da barragem de Vajont (1963) na Itália. Portanto, análises das incertezas referentes ao galgamento são primordiais para entendimento da variabilidade de ocorrência do mesmo e serão discutidas mais adiante neste trabalho.

O galgamento na barragem de Orós, no Ceará é considerado um dos maiores acidentes com barragens no país. A barragem de Orós é uma estrutura de terra semicircular, com 54 m de altura e 620 m de extensão. Sua construção teve início em outubro de 1958 e em 22 de março de 1960, o nível d'água do reservatório elevou-se

como resultado de precipitações pluviométricas maiores que 635 mm em menos de uma semana. Diante da possibilidade de galgamento, aumentou-se a cota do aterro e no dia 25 de março, para diminuir a velocidade de erosão no centro do barramento, um canal foi escavado à direita do aterro. Às 23:50 h do mesmo dia, a barragem foi galgada por uma onda com 30 cm acima da crista, resultando em uma brecha de 200 m de comprimento e 35 m de altura, como na Figura 2. Essa foi responsável por esvaziar aproximadamente 90% do reservatório, gerando uma cheia com pico de 9.600 m³/s (Jansen, 1983).



Figura 2. Barragem de Orós após a ruptura Fonte: Maestri (2012).

Mais de 100.000 pessoas foram evacuadas no Vale do Jaguaribe e foram emitidos alertas após o galgamento. Sendo o número de vítimas estimado em 1.000 (Jansen, 1983).

As barragens Euclides da Cunha e Limoeiro localizam-se no Rio Pardo, no estado de São Paulo. Ambas barragens de terra que romperam em 19 de janeiro de 1977, por galgamento ocasionado pela associação de chuvas intensas, que resultaram em uma cheia próxima a de projeto e problemas operacionais nos extravasores da barragem (CBDB, 1982). Durante 4 horas, a barragem de Euclides da Cunha foi encoberta por uma lâmina de 1,2 m. Como resultado, houve a formação de uma brecha de 131 m de largura e 53 m de profundidade, mostrado nas Figuras 3 e 4.

A ruptura da barragem Euclides da Cunha provocou uma onda de cheia que atingiu a barragem Limoeiro em poucos minutos, causando o galgamento dessa barragem com lâmina d'água de 1,2 m. Também ocorreu o desenvolvimento de brecha de 168 m de largura

e 35 m de profundidade. Apesar de não haver registros de perdas de vidas humanas, aproximadamente 4.000 residências foram atingidas.

A barragem de Vajont corresponde a uma barragem em arco de concreto, localizada em Pordenone, Friuli Venezia Giulia, na região dos Alpes na Itália. Apresenta 265 m de altura, crista com comprimento de 190 m, reservatório com volume de 0,168 km³ e vertedouro com capacidade de 424 m³/s (CBDB, 2013). Geologicamente está situada sobre calcário intercalado com argilito. Em 1963, a região foi atingida por chuvas excepcionais que promoveram a elevação do nível do reservatório.



Figura 3. Barragem Euclides da Cunha antes da ruptura. Fonte: CBDB (1982).



Figura 4. Barragem Euclides da Cunha após a ruptura. Fonte: CBDB (1982).

A baixa resistência ao cisalhamento do argilito e a fácil dissolução do calcário (Jansen, 1983), associadas com a saturação do maciço resultaram no deslizamento de um volume de rocha de aproximadamente 240 milhões de metros cúbicos no reservatório, com velocidade de 30 m/s, gerando uma onda com 99 m acima da crista da barragem.

Apesar de não ter ocorrido a ruptura do barramento, áreas a jusante como as vilas de Longarone, Faé, Pirago, Villanova e Rivalta, foram devastadas, levando a morte de 2600 pessoas, visto nas Figuras 5 e 6 (CBDB 2013).



Figura 5. Vila de Longarone antes do galgamento. Fonte: CBDB (2013).



Figura 6. Vila de Longarone após o galgamento. Fonte: CBDB (2013).

3 AVALIAÇÃO DO RISCO DE GALGAMENTO

Métodos estatísticos utilizados em engenharia são também comumente utilizados em outras áreas pela sua ampla aplicação. Atualmente, com várias aplicações (Lima et al., 2015, Goodarzi et al., 2013, Sun et al., 2012) tem-se visto que o método de Monte Carlo resulta em valores confiáveis de vulnerabilidade das estruturas.

O método é uma simulação numérica que replica variáveis aleatórias de entrada com base em uma distribuição de probabilidade específica (Tung e Yen, 2005). A simulação de Monte Carlo é frequentemente usada para análise de risco e confiabilidade, especialmente quando as variáveis de entrada são incertas.

No entanto, existem duas grandes preocupações com a simulação de Monte Carlo: primeiro,

grande consumo computacional para gerar valores aleatórios e, segundo, requer um grande número de iterações para encontrar resultados precisos (Goodarzi et al., 2011).

Apesar de suas limitações o método é bastante representativo quando usado uma amostragem grande o suficiente (Iqbal, 2012). Além disso, Segundo Bjerager (1989) o método calcula a exata probabilidade de falha de todo o sistema estrutural.

O conceito básico do método de Monte Carlo é mostrado na Figura 7. A simulação permite a um gerador de números aleatórios selecionar qualquer valor em uma dada amplitude. Se for uma distribuição normal, os valores próximos da média serão mais frequentemente gerados do que valores extremos.

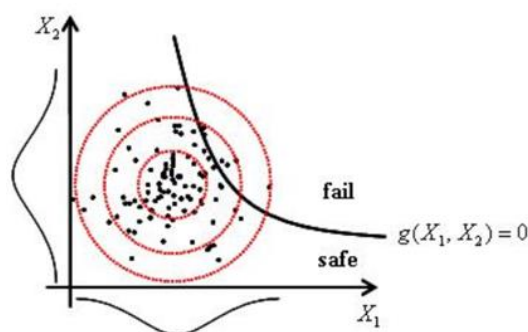


Figura 7 – Método de Monte Carlo. Fonte: Lee & Hwang (2008).

A simulação de Monte Carlo é o uso de números aleatórios simulados para estimar algumas funções de uma distribuição de probabilidade. Um problema que não possui um componente estocástico às vezes também pode ser colocado como um problema com um componente que pode ser identificado com a expectativa de alguma função de uma variável aleatória. O problema é resolvido estimando o valor esperado pelo uso de uma amostra simulada a partir da distribuição da variável aleatória (Gentle, 2010).

Os métodos de Monte Carlo usam números aleatórios; portanto, para implementar um método de Monte Carlo, é necessário ter uma fonte de números aleatórios. Eles são amplamente utilizados no desenvolvimento de métodos estatísticos, muitas vezes para comparar métodos ou modificações de métodos. Os

métodos de Monte Carlo também podem ser usados diretamente em inferência estatística, por exemplo, em Testes de Monte Carlo e nos métodos paramétricos de inicialização (Gentle, 2010).

Assim, considere n_f o número de ciclos em que o valor de um indicador de desempenho deu abaixo ou acima do valor tolerado e N o número total de ciclos de simulação, portanto, a probabilidade de falha é estimada por:

$$P_f = \frac{n_f}{N} \quad (1)$$

Fica-se entendido que o método usado na simulação de Monte Carlo cria uma série de análises aleatórias a partir das propriedades probabilísticas conhecidas, de modo que resolve o problema várias vezes para dar o resultado pretendido. Se N se aproxima do infinito, então a probabilidade de falha se torna exata. Nesse caso, as simulações são geralmente extensas e as incertezas que podem ocorrer não podem ser negligenciadas. Assim, um grande número de simulações é necessário para obter uma estimativa mais precisa (Iqbal, 2012).

4 VARIÁVEIS DA PROBABILIDADE DE RISCO DE GALGAMENTO

A partir do modelo probabilístico definido na caracterização do problema é necessário decidir as variáveis que serão estudadas que podem causar o risco de galgamento nas barragens. As abordagens geralmente utilizadas para o cálculo do risco estão associado com extrema precipitação e escoamento superficial. O galgamento depende de uma série de análises probabilísticas de chuva-escoamento e análises incertas associada com suas variáveis de entrada (Sun et. al., 2012). Por exemplo, tem-se o nível inicial da coluna de água, inundações e velocidade do vento.

Um processo geral do risco e análise das incertezas em estudos desse tipo podem incluir: coleta de dados, análise da frequência de inundação e vento, identificação dos fatores das incertezas na análise de galgamento, roteamento

do reservatório, e risco e análises das incertezas (Figura 8).

Para avaliar o risco de galgamento associado com a ruptura da barragem é preciso estabelecer um método de transformar o nível de água em probabilidade de galgamento. Além disso, a falha pode ser definida como o carregamento (L) que excede a resistência ou a capacidade do sistema (R).

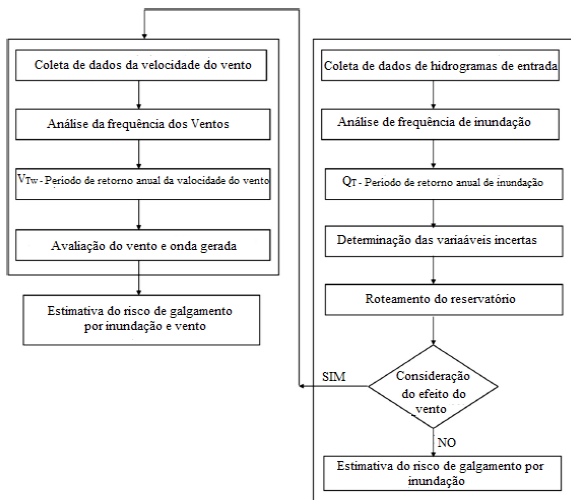


Figura 8 - Fluxograma da probabilidade de galgamento de barragem (Goodarzi et al., 2013)

Identificar ambas variáveis é um problema fundamental na análise de risco e é notável que depende do tipo de estrutura hidráulica e o problema físico em questão. Tung e Yen (2005) defina a probabilidade de falha como:

$$\text{Probabilidade de falha} = P(L > R) \quad (2)$$

onde:

$P(\dots)$ é a probabilidade de falha.

O risco pode ser também apresentado como:

$$\alpha = \text{Risco} = P(Z < 0) \quad (3)$$

onde:

Z é a função de performance que pode ser definida como $Z = R - L = (R/L) - 1$, e

$$Z = \ln(R/L) \quad (4)$$

A função de performance de um sistema de engenharia pode ser descrito em várias formas

em que a seleção de cada forma depende do tipo de distribuição da função de performance. Para informações sobre as várias funções de performance e suas aplicações hidráulicas em sistemas de engenharia podem ser vistas em Yen (1979) *apud* Goodarzi et al., (2013).

4.1 Modelagem do risco de galgamento por inundação e vento

Em análises de galgamento, a altura de água máxima no reservatório (H_{max}) e a altura da barragem (H_R) pode ser considerada como o carregamento e a resistência do sistema, respectivamente. Portanto, a probabilidade de galgamento com respeito a função de performance devido a diferentes escoamentos e velocidades de vento podem ser expressos como (Goodarzi et al., 2013):

$$Z_f = \ln \left(\frac{H_R}{H_{max}} \right) \quad (5)$$

e

$$Z_{fw} = \ln \left(\frac{H_R}{H_{max} + H_w} \right) \quad (6)$$

onde:

Z_f = função de performance de inundação;

Z_{fw} = função de performance da inundação e vento;

H_R = altura da crista da barragem;

H_w = altura total da onda;

H_{max} = altura máxima da lâmina de água durante um evento de inundação, baseado no roteamento do reservatório.

Assim, a probabilidade de galgamento será calculada por (Goodarzi et al., 2013):

$$\text{Risco} = 1 - \phi \left(\frac{\mu_z}{\sigma_z} \right) = 1 - \phi(\beta) \quad (7)$$

onde:

β é o índice de confiabilidade e é definido como o valor médio do indicador de desempenho (μ_z) em relação ao seu desvio padrão (σ_z).

4.2 Roteamento do reservatório

Um dos objetivos da análise de probabilidade de risco de barragens é estimar a altura de água no reservatório sob várias vazões de entrada e velocidade do vento e comparar esses valores com a altura da crista da barragem. A equação da continuidade é bastante utilizada no modelo de inundação na seguinte forma básica:

$$I - Q = \frac{ds}{dt} \quad (8)$$

onde:

I = vazões de entrada (m^3/s);

Q = são as vazões de saída (m^3/s);

s = armazenamento (m^3);

t = tempo (s).

A forma de implementação do roteamento do reservatório pode ser escrita da forma:

$$\frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{Q_t + Q_{t+1}}{2} = \frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} \quad (9)$$

onde:

I_t e I_{t+1} são as vazões de entrada no reservatório (m^3/s);

Q_t e Q_{t+1} são a vazão de saída do reservatório (m^3/s);

S_t e S_{t+1} são o armazenamento do reservatório (m^3) em t e $t+1$, respectivamente;

Δt é o intervalo de tempo (s).

4.3 Modelos de Vento

Vento pode ser definido como o movimento horizontal do ar, que é gerado se o balanço de temperatura muda por causa da diferença de energia. O vento pode gerar ondas, aumentar a altura da água do reservatório e, conseqüentemente, aumentar a probabilidade de ocorrer galgamento. Portanto, há um requerimento em criar uma relação entre o período de retorno do vento (T_w) e a velocidade do vento em um desejado período de retorno (V_{T_w}) para calcular o efeito do vento, amplitude de onda e a altura total da elevação de água. USBR (1992) desenvolveu um método para estimar a geração de ondas ocasionada por ventos em reservatórios. Goodarzi et al. (2013) mostra que a altura total da onda pode ser estimada da forma:

$$H_w = Y_R + Y_S \quad (10)$$

onde:

H_w = altura total da onda (m);

Y_R = máxima amplitude de uma onda regular (m);

Y_S = efeito do vento (m).

4.4 Análises das incertezas

Incertezas refere-se a condição ou variável, que não é possível de ser quantificada exatamente e tem características aleatórias. Para esses casos a amostragem dos dados históricos não são grandes os suficientes e os dados incluem todos os tipos de erro. Assim, a amostragem é potencialmente um método aplicável para compor dados de valores de entrada aleatórios compostos e obter resultados com aproximações apropriadas. Portanto, o modelo de Monte Carlo é totalmente aplicável nas análises incertas.

5 SOLUÇÕES PARA GALGAMENTO

Além do cálculo do potencial de risco de barragens, pode-se trabalhar também com prevenções para que a probabilidade da ruptura por galgamento diminua.

Na engenharia de barragens são utilizadas duas formas principais de prevenção do risco de galgamento, são elas: a detecção, que busca a medição continua de parâmetros que possam gerar situações potenciais de galgamento, e a prevenção, que a partir da experiência adquirida de obras de barragens busca-se prevenir situações que possam contribuir para o fenômeno de galgamento.

Quanto ao problema de vazão superior a capacidade a barragem, a solução é em caráter de detecção, através do monitoramento do nível de afluentes e do reservatório por sistema de telemetria. Já como prevenção, o controle do nível de água do reservatório e formação de volume de espera.

No que diz respeito aos escorregamentos a montante do reservatório e a formação de ondas tem-se como detecção, o monitoramento de

estabilidade de taludes na região do reservatório. Para prevenção tem-se a estabilização dos taludes, onde haja necessidade. Quanto às falhas de projetos, somente a prevenção é a melhor medida contra o galgamento de barragens.

6 CONCLUSÕES

Ruptura de barragens são fenômenos que acontecem em todos os lugares no mundo e pode estar relacionado com uma infinidade de circunstâncias. Assim, estudos que possam prevenir danos a essas estruturas não devem ser negligenciados pelas autoridades, contratantes e construtores.

As soluções desses danos causados não são focadas apenas em reforços estruturais. Atualmente, os métodos estatísticos aliados com estudos hidrológicos, geográficos, climáticos e outros, trazem uma maior confiabilidade no que diz respeito aos projetos de barragem. Além disso, os métodos computacionais em conjunto com os estudos estatísticos de probabilidade trazem a confiabilidade dos riscos para diferentes tempos de retorno de problemas como: chuvas intensas, ventos intensos na localidade da barragem, variação do volume do rio e outros.

Contudo, apesar da importância da realização de análises da probabilidade de risco do galgamento, verificações constantes da instrumentação na barragem, seja de poro pressão ou de deformações, e até mesmo análises do comportamento não saturado nos taludes não devem ser menosprezadas.

Deve-se contar ainda, com medidas eficientes de comunicação de risco a população, através de treinamentos e sistemas de avisos, para evacuação em casos de possíveis danos a jusante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), e Conselho Nacional

de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- Bjerager, P. 1989. On computation methods for structural reliability analysis. *Structural Safety*, Vol. 9, 2, 79-96.
- Brasil. 2012. Engecorps Engenharia. Agência Nacional de Águas (Org.). Elaboração de Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias nas Bacias dos Rios Muriaé e Pomba e Investigações de Campo Correlatas. *Estudos de Ruptura de Barragens*. Brasília: Engecorps, 113 p.
- Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB). 1982. Main Brazilian dams: design, construction and performance. *BCOLD Publications*, Brasil, 637 p.
- Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB). 2013. 50 anos do acidente de Vajont – Itália (1963-2013). *XXIX Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Porto de Galinhas, 2 p.
- Gentle, J. E. (2010). Computational Statistics. *International Encyclopedia of Education*, 93–97.
- Goodarzi, E., Mirzaei, M., Shui, L. T., Ziaei, M. 2011. Evaluation dam overtopping risk based on univariate and bivariate flood frequency analysis, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, Vol. 8, 9757-9796.
- Goodarzi, E., Shui, L.T., Ziaei, M. 2013. Dam overtopping risk using probabilistic concepts – Case study: The Meijaran Dam, Iran. *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 4, 185-197.
- International Commission on Large Dams (ICOLD), 1973. *Lessons from Dam Incidents, reduced edition*, Paris: ICOLD, 205 p.
- Iqbal, A. 2012. Probability of Failure for Concrete Gravity Dams for Sliding Failure. In: *ICOLD Benchmark workshop*, 11, Stockholm. 93 p.
- Jansen, R.B. 1983. Dams and Public Safety. *Water Resources Technical Publication*. Denver: U.S. Department of the Interior. 332 p.
- Johnson, F. A., Illes P. 1976. A classification of dam failures. *Water Power and Dam Construction*, Vol. 28, 12, 43-45.
- Jónatas, R.J.L. 2015. *Rotura de barragens de aterro por galgamento – Ensaio experimentais com aterros homogêneos*. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa. Lisboa. 96 p.
- Lauriano, A., Pimenta, J.A., Cortez, J., Silva, A. 2017. Discussões sobre os modos de falha e risco de galgamento de barragens de rejeito. *II Seminário Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeito*. 17 p.
- Lee, Y.K., Hwang, D.S. 2008. A study on the techniques of estimating the probability of failure. *Journal of the Chungcheong Mathematical Society*, Vol. 21, 4, 573-583.

- Lima, F., Naghettini, M., Espósito, T. 2015. Avaliação da probabilidade de galgamento da barragem da PCH de Cajuru por simulação de Monte Carlo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol. 20, 3, 722-730.
- Maestri, R. 2012. *Esconder desastres não é novidade? (Continuação I)*. Disponível em: <<http://www.engenheiromaestri.com>>. Acesso em 04/11/2018.
- Saliba, A.P.M. 2009. Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 125 p.
- Silva, R.C., Cavalcante, D.M.P., Pedrosa, L.J., Albuquerque, A.L. 2007. *Estudo do comportamento de barragens gravidade de concreto sob ação do galgamento: análise de tensões e estabilidade*. Comitê Brasileiro de Barragens. XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belém, 1-21.
- Sun Y.F., Chang H.T., Miao Z.J., Zhong D.H. 2012. Solution method of overtopping risk model for earth dams. *Safety Science*, Vol. 50, 9, 1906–1912.
- Tung, Y. K., Yen, B. C. 2005. *Hydrosystems engineering uncertainty analysis*, New York: Mc Graw-Hill, 273 p.
- United States Bureau of Reclamation (USBR). 1992. *Freeboard criteria and guidelines for computing freeboard allowances for storage dams*. Denver: US Dept of the Interior, Bureau of Reclamation, 58 p.
- Yen B.C. 1979. Safety factor in hydrologic and hydraulic engineering design. In: McBean E.A., Hipel K.W., Unny T.E., editors. *Reliability in water resources management*. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 389-407.