

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE COMPARATIVA DE CRITÉRIOS EMPÍRICOS E DE ESTABILIDADE NA RUPTURA DE BARRAGENS – ESTUDO DE CASO DA PCH CAVERNOSO

*Camila Fabiani¹; Guilherme Piaie de Oliveira Palma²; Hudson Goto³; Candice Schauffert
Garcia⁴; Laertes Munhoz da Cunha⁵; Andréia Pedroso⁶ & Fernando Fonseca de Freitas⁷*

RESUMO – Este artigo compara dois critérios utilizados como base para a definição do instante de ruptura de barragens de concreto em modelos *dam-break*. No estudo foi realizada a comparação dos resultados de duas simulações de ruptura da barragem da PCH Cavernoso, localizada no estado do Paraná. Para definição das condições de ruptura, a primeira simulação utilizou o critério da ANA (2016), em que a brecha tem início quando o nível de água no reservatório atinge 0,15 m acima da cota de coroamento da barragem. A segunda simulação seguiu o cálculo da estabilidade da barragem para os mecanismos de tombamento, deslizamento e flutuação. Como resultado, obteve-se que o rompimento da barragem, por mecanismos de estabilidade, ocorreria com um nível da água 0,17 m acima do adotado pelo critério empírico da ANA, gerando, entretanto, diferenças entre os resultados das simulações de ruptura insignificantes em termos de vazão. Este artigo é inspirado no projeto executado pelas empresas RHA Engenharia e Consultoria SS Ltda., TOPOCART Topografia, Engenharia e Aerolevantamento SS Ltda. e ENGEVIX Engenharia e Projetos S/A, para obtenção de MDT e mapas de inundação para usinas hidrelétricas da COPEL GeT no estado do Paraná.

ABSTRACT– This paper compares two criteria used in the definition of the moment of collapse of concrete dams in dam-break simulations. In this study, the results of two simulations of the hypothetical collapse of Cavernoso Dam, in State of Parana, Brazil, are compared. Each simulation had its collapse parameters defined by different criteria. The first was based on the National Water Agency (ANA) criteria which suggests that the rupture starts when the reservoir water level rise 0,15 m above the dam crest. The second simulation followed the calculation of stability for the dam's mechanisms of limit equilibrium, sliding and flotation. As result, it was obtained that the rupture of the dam by mechanisms of stability would occur with a level 0,17 m above when compared to the adoption of the ANA's empirical criteria, hence the differences between the outcomes of both dam-break simulations are not significant in flow terms. The study is inspired in a project carried out by the companies RHA Engenharia e Consultoria SS Ltda., TOPOCART Topografia, Engenharia e Aerolevantamento SS Ltda. and ENGEVIX Engenharia e Projetos SA, to obtain DTM and flood maps for hydroelectric plants of Copel GeT, in the state of Parana.

Palavras-Chave – Barragem, galgamento, estabilidade.

1, 6) Equipe Técnica - RHA Engenharia e Consultoria SS Ltda. R. Voluntários da Pátria nº 400, 14º andar. Curitiba/PR. (41) 3232-0732.

¹cfabiani@rhaengenharia.com.br; ⁶pedroso@rhaengenharia.com.br.

2, 7) ENGEVIX Engenharia e Projetos S/A. Rodovia Admar Gonzaga nº 440. Florianópolis/SC. (48) 3877-2326.

²guilherme.palma@novaengevix.com.br; ⁷fernando.freitas@novaengevix.com.br.

3) COPEL Geração e Transmissão. Rua José Izidoro Biazetto nº 158. Curitiba/PR. (41) 3331-4184. hudson.goto@copel.com.

4, 5) Diretoria - RHA Engenharia e Consultoria SS Ltda. R. Voluntários da Pátria 400, 14º andar. Curitiba/PR. (41) 3232-0732.

⁴csgarcia@rhaengenharia.com.br; ⁵lmcunha@rhaengenharia.com.br.

1. INTRODUÇÃO

As barragens de concreto são grandes estruturas massivas, uma vez que são projetadas para atender aos requisitos de estabilidade, permeabilidade e vida útil, suportando a pressão permanente da água. A adequada gestão dessas estruturas extrapola a operação do reservatório e abrange os aspectos relacionados à segurança das estruturas, demandando estudos para a definição das manchas de inundação no vale a jusante, causadas por cheias excepcionais ou pela hipotética ruptura do maciço. Esses estudos subsidiam a elaboração de Planos de Ação de Emergência e colaboram para a definição de ações dos empreendedores e da Defesa Civil, buscando salvaguardar vidas humanas e bens materiais.

Nesse contexto, a segurança da barragem é garantida de acordo com os critérios de falha, para todas as combinações de cargas, considerando fatores de segurança. O critério de segurança é a definição do nível de estresse quando a falha ocorre. Os fatores de segurança são escolhidos buscando superar todas as incertezas inerentes ao projeto. Sua magnitude deve refletir a probabilidade da ocorrência para o carregamento específico, a precisão das condições e o método de análise.

Visando assegurar as condições de segurança para as barragens de acumulação de água, a Agência Nacional de Águas (ANA) elaborou o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, no qual estabelece orientações gerais quanto às metodologias e procedimentos a serem adotados. No que tange aos cenários de ruptura a serem considerados, o chamado cenário extremo pressupõe a ocorrência de rupturas rápidas e totais. Baseando-se em observações secundárias que comprovaram que as barragens de concreto suportam o galgamento durante algum tempo antes do rompimento, o Manual da ANA preconiza que, num cenário de ruptura por galgamento, a brecha deve começar quando o nível de água atinge 0,15 m acima da cota de coroamento da barragem.

Por outro lado, a análise de segurança de barragens também pode ser realizada a partir do diagnóstico de estabilidade global dessas estruturas. Segundo CEMIG (1994), os estudos de estabilidade devem comprovar a segurança nas condições de deslizamento, tombamento e flutuação.

Dessa maneira, no presente estudo os dois critérios de ruptura supracitados são simulados no *software* HEC-RAS para o caso da barragem da PCH Cavernoso, empreendimento da COPEL GeT, localizada no estado do Paraná.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Apresentação do empreendimento

A barragem da PCH Cavernoso está localizada no rio Cavernoso, com o município de Virmond em sua margem direita e Candói na margem esquerda, no sudoeste do estado do Paraná (Figura 1). A estrutura é de concreto tipo gravidade e localiza-se a jusante da barragem da PCH Cavernoso II, nas coordenadas 25°29'32" S e 52°12'48" O. A área de drenagem correspondente à seção da barragem é de aproximadamente 1.500 km² e encontra-se a 56 km da foz do rio Cavernoso.

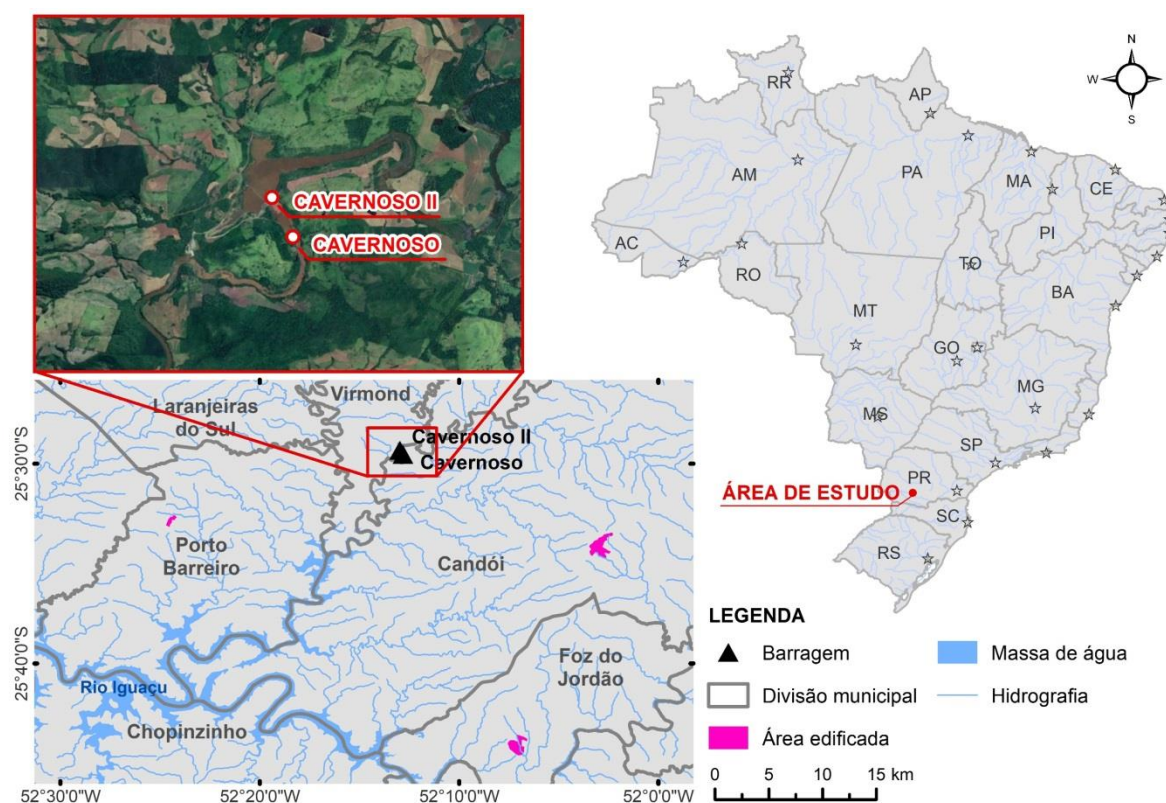


Figura 1 - Localização do empreendimento e municípios próximos

A PCH Cavernoso possui potência instalada de 1,3 MW e teve sua operação iniciada em 07/12/1965 (COPEL, 2017). A barragem possui comprimento de crista de 132 m, altura de 5 m, com coroamento na cota 545,7 m e vertedor do tipo soleira livre, com crista na cota 543,0 m, elevações estas estimadas a partir das informações fornecidas pela COPEL (2017) e compatibilizadas com o referencial dos dados cartográficos utilizados. Ressalta-se que, de posse dessas informações e com base na curva de descarga do vertedor e em estudos hidrológicos recentes, observou-se que essa estrutura foi dimensionada para uma vazão de 900 m³/s, associada à recorrência estimada, com dados atuais, de aproximadamente 12 anos.

O esquema da geometria da seção estrutural de uma barragem de concreto pode ser observado na Figura 2. As informações presentes nessa figura, individualizadas para a barragem da PCH Cavernoso, utilizadas para a análise de estabilidade do maciço, estão expostas na Tabela 1.

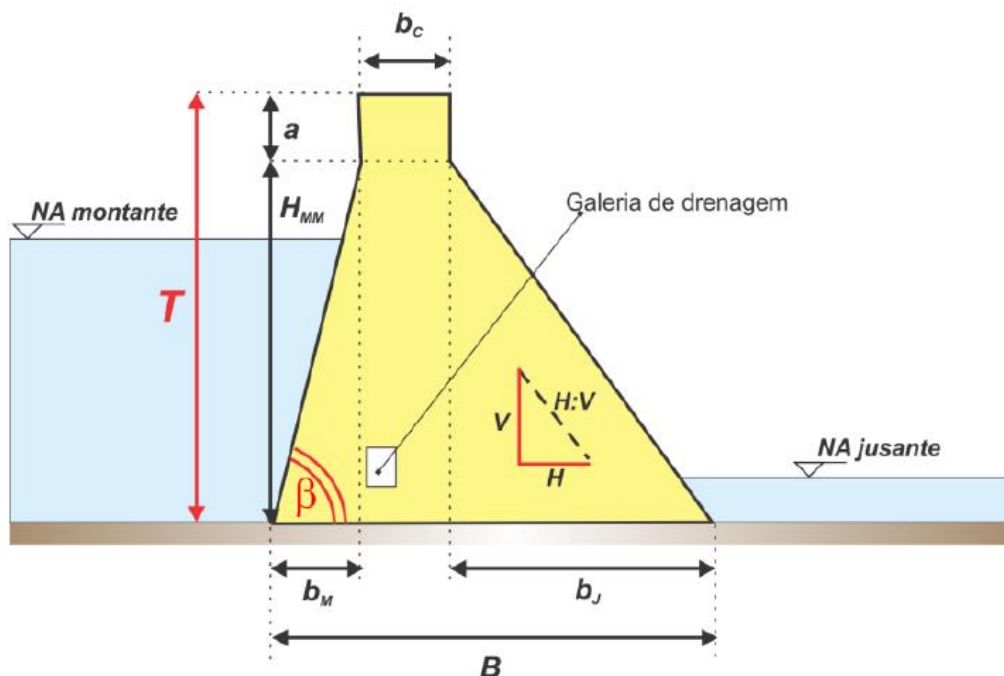


Figura 2 - Seção típica de uma barragem de concreto a gravidade

Fonte: Franco (2012)

Tabela 1-Dimensões da barragem da PCH Cavernoso

H_m (m)	a (m)	β (°)	b_c (m)	H	V
5,0	2,7	90	4,0	0,5	1,0

Fonte: COPEL (2017).

Critérios de rompimento

Os dois critérios de rompimento avaliados neste estudo referem-se à condição de ruptura extrema, que pressupõe a ocorrência do colapso rápido e total, neste caso por galgamento. Assim, os valores dos parâmetros de brecha são agravados e associados a cheias com maiores tempos de recorrência e níveis iniciais de água elevados no reservatório, de forma a resultar no “pior” cenário para obtenção dos resultados mais extremos.

O primeiro critério de rompimento é a adoção de valores de referência na literatura técnica sobre o instante em que se tem o início do rompimento, em função do galgamento da barragem. O Manual do Empreendedor sobre segurança de barragens da ANA (2016) sugere que as barragens de concreto, como a deste estudo, suportam o galgamento por certo tempo antes de romperem, até que a estabilidade seja posta à prova. Esse momento representa o início da abertura da brecha e, segundo o estudo de Hartford e Kartha (1995), citado pelo manual da ANA, ele é determinado pela

elevação do nível de água do reservatório até uma cota 0,15 m acima da cota de coroamento da barragem.

O segundo critério de rompimento é a simulação da ruptura mediante verificação da estabilidade da estrutura, para cada instante, a fim de definir o momento em que ocorre o colapso da estrutura, com o início da formação da brecha. Uma barragem de concreto a gravidade, como no caso da PCH Cavernoso, é uma estrutura maciça constituída por vários blocos de concreto, separados entre si por juntas de contração, para minimizar os efeitos provocados pelas tensões de origem térmica. Possuem forma quase trapezoidal e são projetadas de tal modo que resistam aos esforços decorrentes das pressões hidrostáticas atuantes no seu paramento de montante, assim como a outros esforços, onde o equilíbrio estático realiza-se pelo próprio peso da estrutura. Na Figura 3 são apresentados os principais carregamentos atuantes em uma barragem de concreto.

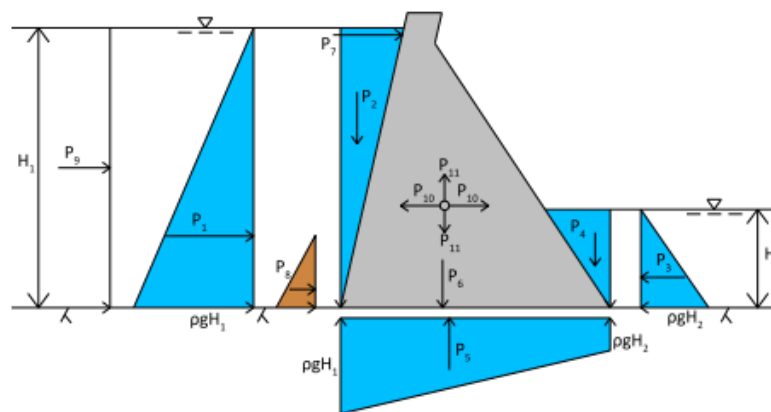


Figura 3 - Principais carregamentos atuantes em uma barragem de concreto a gravidade
Fonte: Broberg e Thorwid (2015)

Na Figura 3 podem ser observadas 11 cargas que atuam ou podem atuar sobre uma barragem de concreto à gravidade, divididas em sete tipos de carregamentos. O primeiro tipo é a pressão hidrostática, que depende do nível de água a montante da barragem, representada pelas cargas P1 e P2. Similarmente, existe a pressão da água a jusante da estrutura, representada pelas cargas P3 e P4. A pressão hidrostática fica associada às condições de variação dos níveis de água do reservatório e a jusante da estrutura. Ainda, a subpressão, que se manifesta no contato da estrutura com a fundação, devido à percolação de água que ocorre no maciço onde a mesma se apoia, é representada pela carga P5, atuando verticalmente na fundação da barragem, no sentido contrário da carga do peso próprio da estrutura (P6). A carga P7 ilustra a pressão de flutuantes que pode ocorrer na face de montante da barragem. A carga P8 representa a pressão do lodo, ou seja, a atuação da pressão ativa dos sedimentos em direção à barragem. Finalmente, as cargas P9, P10 e P11 correspondem às cargas sísmicas advindas das acelerações verticais e horizontais causadas por eventuais abalos (ELETROBRAS, 2003).

Conforme a magnitude e a forma de atuação das cargas na barragem à gravidade, pode ocorrer a falha dessa estrutura de concreto. Não há consenso sobre a definição de falha de barragem, mas de forma geral, pode ser explicada como “colapso ou movimento de parte de uma barragem ou de sua fundação, impedindo que ela retenha água” (ICOLD, 1995).

Existem vários comportamentos de falha em barragens de concreto. Quando a fundação da estrutura está em contato com rochas, por exemplo, o tipo de colapso mais comum é por cisalhamento ou deslizamento. Isso ocorre quando a força de atrito é superada pelas forças horizontais. Alguns tipos de falhas por deslizamento são ilustrados na Figura 4. A primeira é a ocorrência de deslizamento entre concreto e fundação (Figura 4 a), a segunda é quando o deslizamento ocorre em planos fracos na fundação, como por exemplo em rachaduras (Figura 4 b), e, por fim, a terceira quando a falha se dá na fundação sólida (Figura 4 c). Ainda, o deslizamento pode ocorrer no maciço da barragem em planos fracos, sejam eles rachaduras ou mesmo juntas de construção (Broberg e Thorwid, 2015).

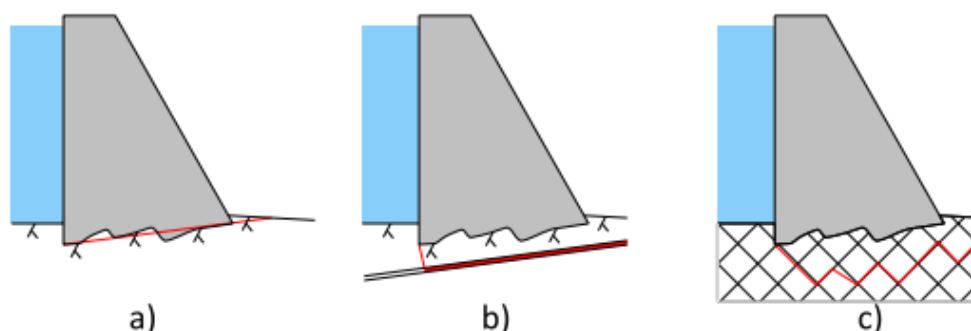


Figura 4 - Princípio de deslizamento de uma barragem de concreto a gravidade

Fonte: Broberg e Thorwid (2015)

As barragens podem também falhar por esmagamento, quando as tensões de compressão internas ao concreto atingem valores maiores que sua resistência material. Ainda, a tensão de tração também pode ultrapassar a resistência do concreto e levar a barragem à falha total. Outro tipo de falha é o tombamento, em que a barragem gira em torno do próprio pé, impulsionada por forças de rotação, como ilustrado na Figura 5.

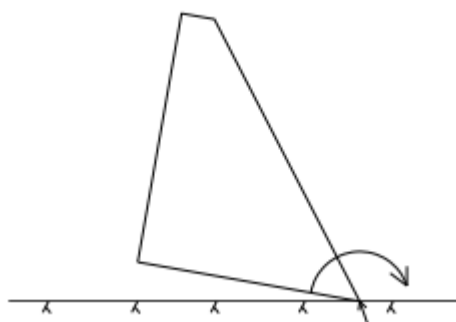


Figura 5 - Princípio de tombamento de uma barragem de concreto a gravidade

Fonte: Broberg e Thorwid (2015)

Por fim, existe o mecanismo de falha por flutuação, que é o fenômeno que ocorre quando as forças que agem na base da barragem, de baixo para cima, são maiores que as forças resultantes do peso próprio. A flutuação existe quando os esforços de subpressão são muito grandes (Broberg e Thorwid, 2015).

Simulação hidrodinâmica e cálculo da estabilidade

Para a simulação do galgamento e da ruptura induzida foi utilizado o *software* HEC-RAS 5.0.5, desenvolvido pelo *Corps of Engineers* do exército americano, que tem capacidade de simular escoamento em regime permanente e não permanente, unidimensional e bidimensional ou híbrido. A modelagem em regime não permanente é realizada utilizando os princípios da conservação da massa e do momento. As equações são resolvidas por procedimentos de diferenças finitas, em que, para todas as seções, as equações são resolvidas simultaneamente, permitindo a utilização de intervalos de cálculo inferiores ao necessário para a solução explícita. As perdas de energia decorrentes do atrito do escoamento são calculadas utilizando a equação de Manning (USACE, 2016).

No modelo, foram inseridas as seções transversais do rio, conforme levantamento batimétrico e MDT disponíveis. A barragem da PCH Cavernoso foi inserida entre duas seções transversais com as dimensões e características dos dispositivos de descarga, tais como: tipo de perfil, altura, largura e coeficiente de descarga. As dimensões finais e o tempo de formação da brecha também foram informados, atendendo critérios da ANA, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2- Características da brecha da PCH Cavernoso

Parâmetro	Valor
Altura da brecha (m)	5,0
Largura da brecha (m)	66,0
Tempo de ruptura (min)	15,0

Para avaliar a progressão da brecha no tempo no HEC-RAS foram consideradas taxas de crescimento vertical e horizontal iguais a meia onda seno, em que a taxa de incremento cresce lentamente no início da formação da brecha.

Para o cálculo da estabilidade foi utilizado o método das fatias (ELETROBRÁS, 2003), que analisa a estabilidade global das estruturas. Nesse método é considerada uma seção unitária (fatia) transversal, representando toda a estrutura e seu respectivo peso próprio (volume da fatia vezes o peso específico do material). A seção considerada é escolhida entre as “fatias” menos estáveis, ou seja, a de menor área transversal e consequentemente de menor peso próprio. Os demais esforços atuantes também são considerados levando-se em conta a seção transversal em análise, como é o caso de empuxos, subpressão e cargas aplicadas, que nesse caso são considerados atuando na

largura da fatia. A partir das ações e reações, foram determinados os fatores de segurança da estrutura para flutuação, deslizamento, tombamento e tensão máxima admissível na fundação. Cabe ressaltar que, para fins de simplificação, não foram considerados esforços dinâmicos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente, foi simulada a passagem da onda de cheia com tempo de recorrência de 10.000 anos, sem a ruptura da barragem, para verificação dos níveis de galgamento e o cálculo da estabilidade. Na Figura 6 são apresentados os resultados da simulação.

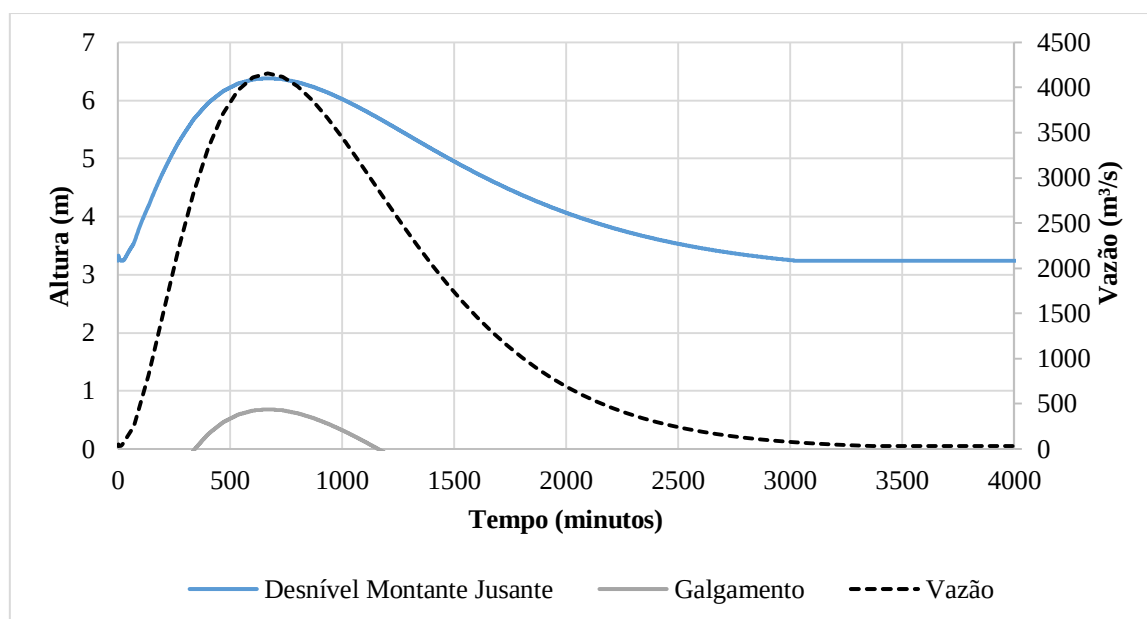


Figura 6 – Simulação da cheia

Foi verificada na simulação realizada que ocorre, como esperado, o galgamento da barragem para a cheia com recorrência de 10.000 anos, devido à capacidade insuficiente do vertedouro em relação às novas vazões de cheias estimadas para a bacia do rio Cavernoso. O valor máximo de galgamento é de 0,68 m acima da cota de coroamento da barragem, no instante coincidente com o pico da cheia.

Os fatores de segurança ao longo da passagem da cheia com recorrência de 10.000 anos são apresentados na Figura 7.

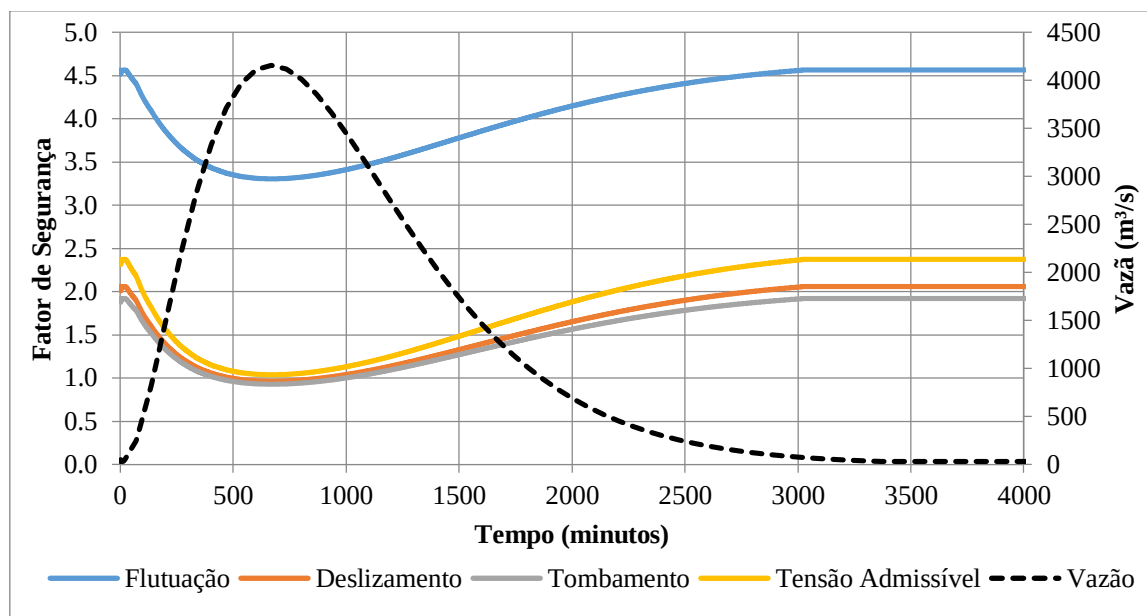


Figura 7 – Simulação da cheia e análise de estabilidade

Na análise de estabilidade verificou-se que os valores mínimos para os fatores de segurança foram atingidos com o desnível de água máximo, entre montante e jusante, em 6,38 m e galgamento de 0,68 m, sendo este o instante em que ocorre o maior desequilíbrio entre as ações e as reações. Neste instante, o fator de segurança mínimo obtido para o tombamento foi de 0,93, para o deslizamento 0,96, para a tensão admissível 1,04 e para flutuação 3,31. Os fatores de segurança para tombamento, deslizamento e tensão admissíveis obtidos são inferiores ao valor de 1,1, considerado como limite para condições extremas, como seria o caso de galgamento da barragem. Considerando que o início do colapso das estruturas ocorre quando o fator de segurança iguala-se ao mínimo admissível, verificou-se que a condição de tombamento constituiu-se, neste caso, na maior possibilidade de falha. O tombamento iminente, associado ao referido fator de segurança, corresponde ao instante em que o galgamento atinge o nível 0,32 m acima da cota de coroamento da barragem, com uma vazão afluente de 3.440 m³/s, a qual corresponde a um tempo de recorrência de aproximadamente 2.000 anos.

Ressaltando, o mais provável nessa condição é que a barragem da PCH Cavernoso venha a falhar, por tombamento, no instante em que o galgamento atinge 0,32 m acima da cota de coroamento. Este resultado indica o início da instabilidade da barragem, com o nível da água no reservatório 0,17 m acima ao preconizado no primeiro critério (ANA - 2016), o que conduziria a uma diferença de vazão de pico, resultante da ruptura, da ordem de 3,5%, ou seja, coerente com os intervalos típicos de incertezas em estudos desta natureza.

4. CONCLUSÕES

As simulações de ruptura da barragem da PCH Cavernoso, pelos dois critérios avaliados neste estudo de caso, apresentaram resultados com diferença superior a 50%, em relação à altura da lâmina de água no galgamento, porém muito próximos em relação ao pico de vazão devido à ruptura, podendo ser considerados equivalentes. Portanto, a adoção do critério da ANA (2016) mostrou-se, neste caso específico, adequada, sem comprometimento dos resultados obtidos.

AGRADECIMENTOS – Os autores agradecem ao engenheiro Cassiano Bastos Moroz, da RHA Engenharia e Consultoria SS Ltda., pelo apoio na elaboração deste artigo, bem como à COPEL GeT, pela permissão do uso das informações da PCH Cavernoso.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (2016). *Guia de orientação e formulários do Plano de Ação de Emergência - PAE*. Brasília: ANA.
- BROBERG, L.; THORWID, M. (2015). *Evaluation of failure modes for concrete dams*. KTH Royal Institute of Technology. Estocolmo, Suécia.
- CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS – ELETROBRÁS (2003). *Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas*. Rio de Janeiro, 278 p.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG (1994). *Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas*. Companhia Energética de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil de Geração. Belo Horizonte.
- COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA – COPEL (2017). *Manual de Informações Hidráulico-Operativas*.
- FRANCO, D. (2012). *ENS 5168 – Obras hidráulicas – Notas de aula*. UFSC, Florianópolis.
- ICOLD (1995). *Dam failures statistical analysis*. Bulletin 99. International Commission on Large Dams. Paris.
- USACE (2016). *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. Version 5.0.