XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

INFLUÊNCIA DO AMORTECIMENTO DE RESERVATÓRIO NA VERIFICAÇÃO DA SUFICIÊNCIA HIDRÁULICA DE VERTEDOURO: ESTUDO DE CASO EM LAGOA ENQUADRADA COMO BARRAMENTO

Thiago Liberato de Veiras [1] ; Leonado de Souza [2]; Rodolfo Rosendo de Carvalho[3] & Joaquim Duarte [4]

RESUMO – A segurança de barragens no Brasil exige a verificação da suficiência hidráulica das estruturas extravasoras frente à cheia de projeto. Em estruturas com grande capacidade de armazenamento, a desconsideração do amortecimento do reservatório pode conduzir a diagnósticos incorretos de insuficiência hidráulica. Este trabalho apresenta o estudo de caso da Lagoa Maior, localizada na Cidade Administrativa Presidente Tancredo Neves, em Belo Horizonte (MG), cujo vertedouro tipo tulipa foi avaliado para o tempo de retorno de 10.000 anos. A verificação simplificada, baseada na comparação direta entre a vazão de pico afluente estimada pelo método racional (41,05 m³/s) e a capacidade de descarga do extravasor, indicou insuficiência hidráulica. Contudo, a simulação chuva-vazão integrada ao trânsito de cheia no HEC-HMS, cuja chuva crítica de 24 h resultou em pico afluente inferior (9,7 m³/s) porém maior volume precipitado, reverteu esse diagnóstico: a vazão defluente máxima foi de 1,6 m³/s e o nível máximo atingido (787,6 m) manteve borda livre de 8,4 m em relação ao coroamento. Conclui-se que a incorporação do efeito de amortecimento é metodologicamente indispensável na avaliação de vertedouros em reservatórios com elevada capacidade de regularização.

ABSTRACT– Dam safety in Brazil requires verifying the hydraulic adequacy of spillways against the design flood. For structures with large storage capacity, neglecting reservoir attenuation may lead to incorrect hydraulic insufficiency diagnoses. This paper presents a case study of Lagoa Maior, located at the Cidade Administrativa Presidente Tancredo Neves complex in Belo Horizonte, Brazil, where a morning glory spillway was evaluated for a 10,000-year return period. A simplified analysis comparing the peak inflow estimated by the rational method (41.05 m³/s) directly against the spillway discharge capacity indicated hydraulic insufficiency. However, rainfall-runoff simulation coupled with flood routing in HEC-HMS, whose critical 24-h storm produced a lower peak inflow (9.7 m³/s) but greater rainfall volume, reversed this finding: the maximum outflow was 1.6 m³/s and the peak water level (787.6 m) maintained a freeboard of 8.4 m below the dam crest. Results demonstrate that incorporating reservoir attenuation is methodologically essential when assessing spillway adequacy in reservoirs with significant storage relative to the contributing basin.

Palavras-Chave
Segurança de barragens; Amortecimento de reservatório; Vertedouro tipo tulipa.

[1]) G5 Engenharia, R. Nunes Machado nº 68 Curitiba, (41) 3402-1707 e tl@g5engenharia.com.br.
[2]) G5 Engenharia, R. Nunes Machado nº 68 Curitiba, (41) 3402-1707 e lsl@g5engenharia.br.
[3]) G5 Engenharia, R. Nunes Machado nº 68 Curitiba, (41) 3402-1707 e rrc@g5engenharia.com.br.
[4]) G5 Engenharia, R. Nunes Machado nº 68 Curitiba, (41) 3402-1707 e jd@g5engenharia.com.br.

1. INTRODUÇÃO

A segurança de barragens no Brasil ganhou maior relevância com a Lei Federal nº 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e consolidou a necessidade de avaliação sistemática de estruturas destinadas à acumulação de água, incluindo barramentos associados a lagoas e reservatórios de diferentes finalidades, quando enquadrados nos critérios legais aplicáveis, conforme BRASIL (2010). Nesse contexto, a verificação da capacidade hidráulica das estruturas extravasoras é essencial para avaliar o risco de sobrelevação do nível d'água e de galgamento.

Uma abordagem usual consiste na comparação direta entre a vazão de pico da bacia contribuinte e a capacidade de descarga do extravasor; embora conservadora, essa simplificação pode não representar sistemas com reservação significativa, nos quais o armazenamento amortece o hidrograma e altera o nível máximo atingido no reservatório (CHOW *et al.*, 1988).

Dessa forma, parte-se da hipótese de que a consideração do amortecimento pode alterar o diagnóstico de suficiência hidráulica de uma estrutura extravasora em relação à verificação simplificada baseada apenas na vazão de pico. Assim, este trabalho avalia a influência do trânsito de cheias na verificação hidráulica do vertedouro tipo tulipa da Lagoa Maior, localizada na Cidade Administrativa Presidente Tancredo Neves, em Belo Horizonte (MG), comparando a análise direta entre demanda hidrológica e capacidade de descarga com a modelagem chuva-vazão integrada ao reservatório no HEC-HMS, utilizado aqui como ferramenta de balanço hídrico para fins de verificação hidráulica, e não como modelo hidrológico calibrado para previsão de vazões, conforme fundamentos apresentados por USACE (2026).

2. METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo

A área de estudo corresponde à Lagoa Maior, localizada no complexo da Cidade Administrativa Presidente Tancredo Neves, em Belo Horizonte (MG). Originalmente concebida com funções paisagísticas e de drenagem, a estrutura passou a ser avaliada sob a ótica da segurança de barragens em razão do barramento de solo compactado que forma o reservatório, em enquadramento compatível com a definição estabelecida pela Lei nº 12.334 (BRASIL, 2010). O sistema possui estrutura extravasora do tipo tulipa, com controle hidráulico representado por orifício retangular na entrada, e as verificações hidráulicas foram realizadas para a cheia associada ao tempo de retorno de 10.000 anos. A localização da área de estudo é apresentada na Figura 1, enquanto suas principais características são sintetizadas na Tabela 1.

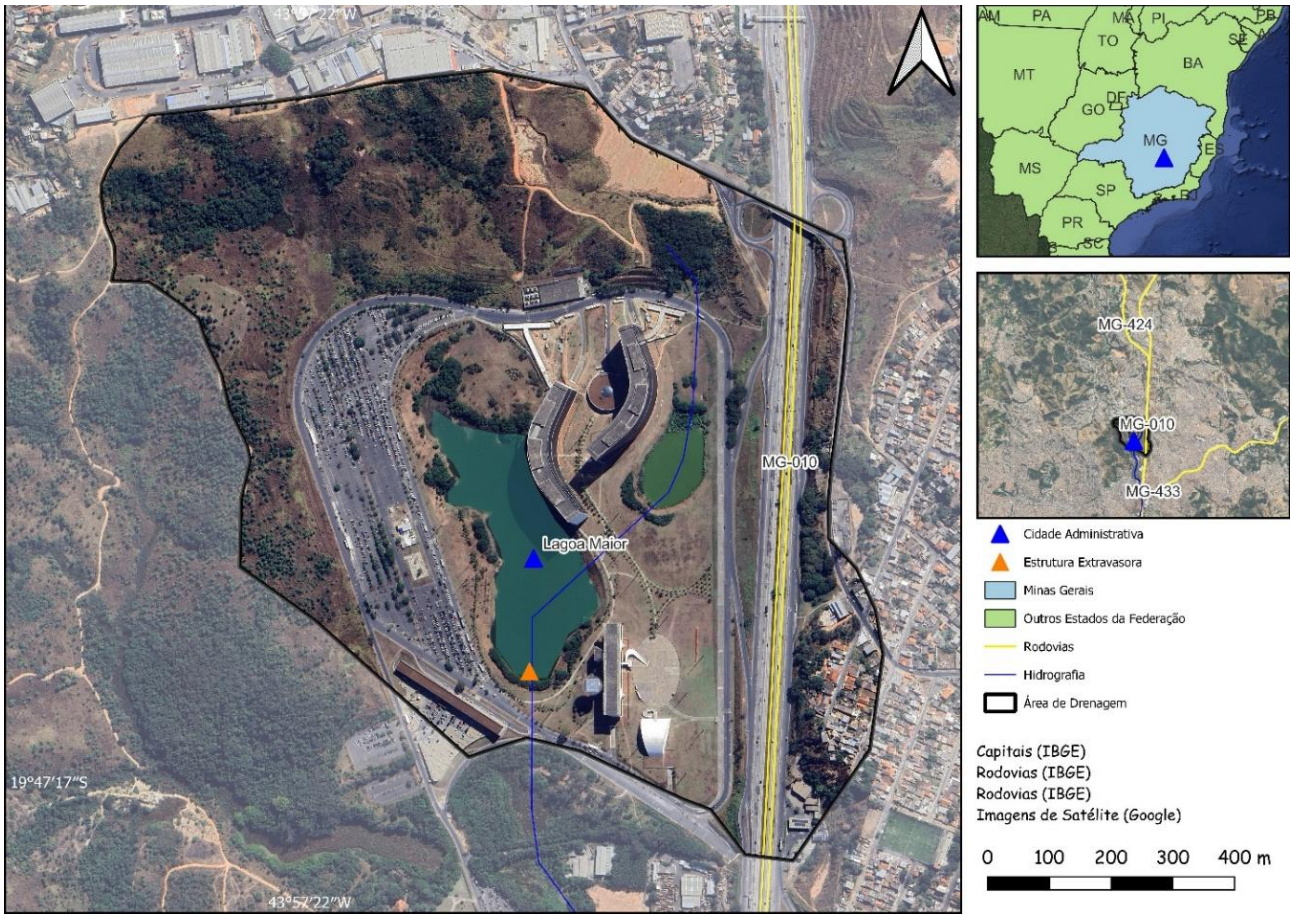


Figura 1 – Localização da Lagoa Maior no complexo da Cidade Administrativa em Belo Horizonte –(MG).

Tabela 1 – Características gerais da área de estudo.

Parâmetro	Informação
Área de drenagem contribuinte	1,05 km²
Área do espelho da água	52.470 m²
Volume (nível normal)	545.478 m³
Profundidade máxima	16 m
Nível d'água normal	781,10 m
Cota da crista do barramento	796 m
Altura máxima do barramento	16 m
Tipo de barramento	Solo Compactado

2.2 Procedimentos metodológicos

A metodologia foi estruturada em duas etapas principais. Inicialmente, foi realizada uma verificação simplificada da suficiência hidráulica da estrutura extravasora, por meio da comparação entre a vazão máxima de projeto, estimada para a bacia contribuinte com Tempo de Retorno (TR) de 10.000 anos, e a capacidade de descarga do vertedouro. Esse TR foi adotado por se tratar de estrutura enquadrada com Dano Potencial Associado (DPA) alto, conforme critérios da PNSB (BRASIL, 2010)

e recomendações da ELETROBRAS (2003), que exigem cenários extremos de probabilidade de cheia para verificação de galgamento em barramentos com população e infraestrutura a jusante.

Em seguida, foi realizada a simulação hidrológica chuva-vazão com trânsito de cheia no reservatório, considerando a curva cota-volume da Lagoa Maior e a curva de descarga da estrutura extravasora. Essa segunda etapa teve como objetivo avaliar o nível máximo atingido no reservatório durante a passagem da cheia de projeto, permitindo verificar diretamente a ocorrência ou não de galgamento e a borda livre remanescente.

A precipitação de projeto foi definida com base na equação intensidade-duração-frequência representativa da área de estudo, conforme Pinheiro e Naghettini (1998). A equação IDF foi aplicada para o tempo de retorno de 10.000 anos, adotado como cenário de verificação hidráulica da estrutura. A forma geral da equação utilizada é apresentada pela Equação 1.

$$i = 0{,}76542 . D^{-0{,}7059} . P^{0{,}5360} . \mu_{t,d} \quad (1)$$

em que (i) é a intensidade de precipitação, em mm/h; (D) é a duração em horas; (P) é a precipitação média anual, em milímetros, $u_{t,d}$ é o quantil de frequência regional, associado ao tempo de retorno e duração da chuva.

Com a topográfia da bacia foi determinado o tempo de concentração pela fórmula de Kirpich, (1940). A vazão máxima de projeto foi estimada inicialmente pelo método racional, utilizado como referência para a verificação simplificada entre demanda hidrológica e capacidade hidráulica do vertedouro. A aplicação do método racional foi realizada conforme a Equação 2.

$$Q_p = 0{,}278 \, . \, C \, . \, i \, . \, A \quad (2)$$

em que (Q_p) é a vazão de pico, em m³/s; (C) é o coeficiente de escoamento superficial; (i) é a intensidade de precipitação, em mm/h; e (A) é a área de drenagem da bacia contribuinte, em km².

O Coeficiente de escoamento foi determinado conforme Chow (1988) a partir do uso do solo da bacia hidrográfica. A bacia em estudo apresenta 18,27% de cobertura vegetal, 43,44% de cobertura rasteira, 32,11% de edificação e pavimento e 6,18% de lago, resultando num coeficiente de escoamento superficial ponderado de 0,447.

Tabela 2 – Parâmetros hidrológicos utilizados na estimativa da vazão de projeto pelo método racional.

Parâmetro	Valor
Comprimento do talvegue principal (m)	822
Desnível do talvegue principal (m)	22
Declividade média do talvegue (m/m)	0,027
Tempo de concentração (min)	17,8
Intensidade de precipitação (mm/h)	312,2
Vazão máxima de projeto (m³/s)	41,05

A capacidade de descarga da estrutura extravasora foi determinada a partir da curva de descarga do vertedouro. Embora a estrutura apresente configuração semelhante a um vertedouro tipo tulipa, o controle hidráulico foi representado por um orifício retangular na entrada da estrutura, considerando que a descarga é governada pela seção de entrada. Dessa forma, a vazão descarregada foi estimada pela Equação 3.

$$Q = C_d . A . \sqrt{2gH} \quad (3)$$

em que (Q) é a vazão descarregada, em m³/s; (C_d) é o coeficiente de descarga para orifícios dependem da geometria de borda; valores típicos em referências hidráulicas variam de 0,55 a 0,65 para bordas vivas, sendo 0,60 adotado como valor conservador (PORTO, 1998); (A) é a área do orifício, em m²; (g) é a aceleração da gravidade, em m/s²; e (H) é a carga hidráulica atuante sobre o centro geométrico do orifício, em metros. Para a seção retangular, a área do orifício foi calculada pelo produto entre a largura e a altura da abertura de entrada.

Tabela 3 – Parâmetros hidráulicos utilizados na curva de descarga da estrutura extravasora.

Parâmetro	Valor
Cota da soleira ou entrada hidráulica (m)	782,49
Largura do orifício (m)	0,90
Altura do orifício (m)	0,30
Área do orifício (m²)	0,27

A simulação hidrológica foi realizada no HEC-HMS, considerando a transformação chuva-vazão da bacia contribuinte e o trânsito da cheia no reservatório para identificação da chuva crítica foram testadas as simulações de chuva sintética para 18 durações distintas: 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h, 8 h, 10 h, 12 h, 18 h, 24 h (1 dia), 48 h (2 dias), 72 h (3 dias), 120 h (5 dias) e 168 h (7 dias). Para a transformação da precipitação efetiva em hidrograma de escoamento superficial, foi utilizado o método do hidrograma unitário do SCS, tendo como parâmetros principais a área da bacia e o tempo de retardo. Quando aplicável, as perdas hidrológicas foram representadas

pelo método SCS-CN, a partir do número de curva definido em função das características de uso e cobertura do solo, grupo hidrológico dos solos e condição de umidade antecedente.

A calibração do modelo chuva-vazão não foi realizada em razão da inexistência de dados fluviométricos e de monitoramento de nível na Lagoa Maior, o que inviabiliza qualquer ajuste ou validação de parâmetros. Isso não compromete o objetivo do estudo, uma vez que o HEC-HMS foi empregado como ferramenta de balanço hídrico entre a vazão afluente sintética e o reservatório, e não como modelo hidrológico calibrado para previsão operacional de vazões, com parâmetros definidos a partir de metodologias consagradas (SCS-CN, HU-SCS, Kirpich).

O trânsito de cheia no reservatório foi representado pelo método de reservatório de nível horizontal, também conhecido como *level-pool routing*. Segundo USACE (2026), esse procedimento é baseado na equação da continuidade e na relação entre armazenamento, elevação e descarga, permitindo calcular, a cada intervalo de tempo, a variação do volume armazenado, a vazão defluente e o nível d'água correspondente no reservatório. No modelo, essa representação foi realizada a partir da curva cota-volume da Lagoa Maior e da curva cota-descarga da estrutura extravasora, sendo a forma geral da equação da continuidade apresentada na Equação 4.

$$\left(\frac{2S_{t+1}}{\Delta_t} + O_{t+1}\right) = (I_t + I_{t+1}) + \left(\frac{2S_t}{\Delta_t} - O_t\right) \quad (4)$$

em que (I_t) é a vazão afluente, em m³/s; (O_t) é a vazão defluente, em m³/s; (S_t) é o armazenamento no reservatório, em m³ e (Δ_t) é o intervalo de tempo da simulação.

As curvas cota-volume e cota-descarga inseridas no modelo foram obtidas, respectivamente, a partir de levantamentos topográficos da Lagoa Maior e da geometria da estrutura extravasora associada à formulação de orifício. Sua associação permitiu ao modelo calcular o nível d'água no reservatório em função do balanço entre vazão afluente, volume armazenado e vazão descarregada, conforme apresentado na Figura 2.

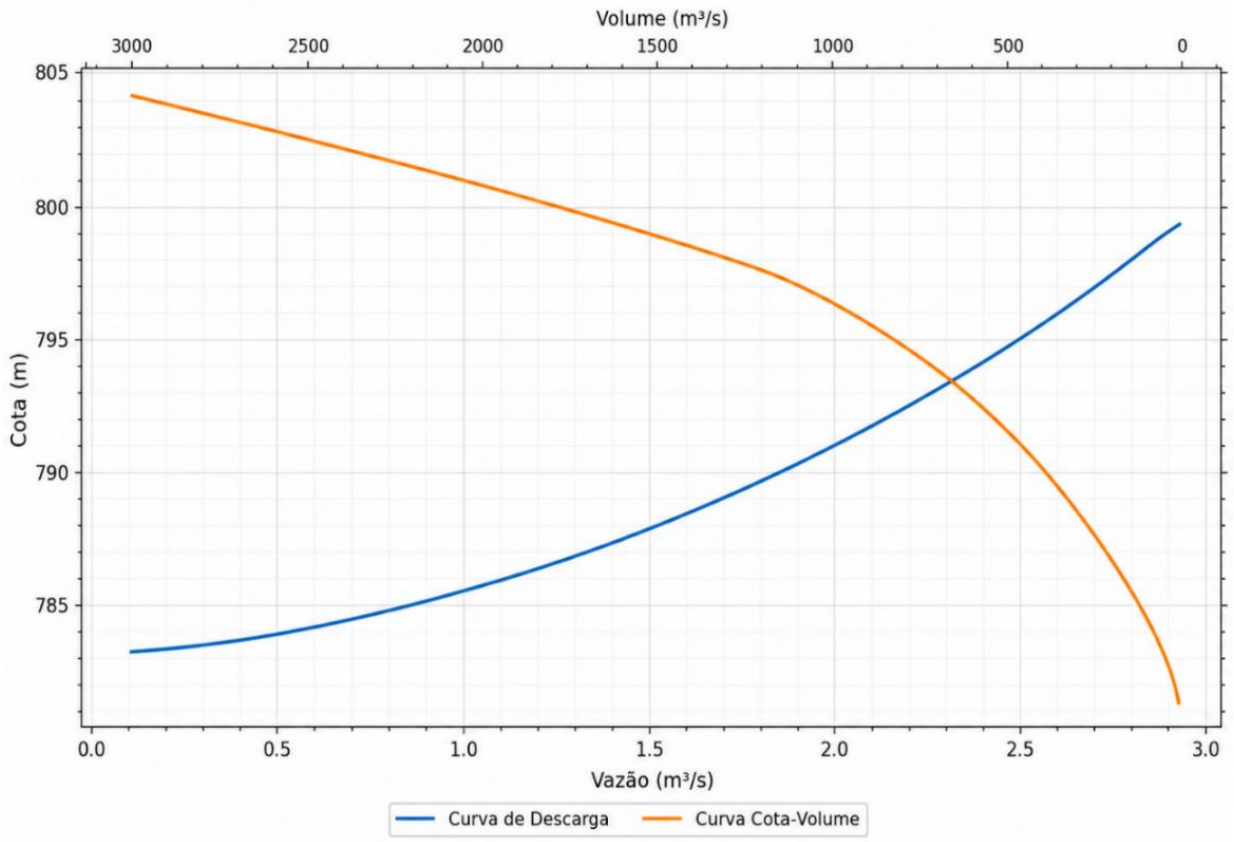


Figura 2 – Curva cota-volume do reservatório e curva cota-descarga da estrutura extravasora utilizadas no trânsito de cheia da Lagoa Maior.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Entre as durações de chuva avaliadas para o tempo de retorno de 10.000 anos, o evento com 24 horas resultou na maior vazão de pico afluente, sendo adotado como cenário crítico para a análise do trânsito de cheia no reservatório. A síntese dos resultados da simulação chuva-vazão para esse cenário é apresentada na Tabela 4, enquanto os hidrogramas afluente e defluente são apresentados nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

Tabela 4 – Síntese dos cenários de duração de chuva simulados no HEC-HMS.

Duração Crítica (horas)	24
Altura da Chuva Crítica (mm)	342,1
Vazão Máxima Afluente (m³/s)	9,7
Vazão Máxima Defluente (m³/s)	1,6
Elevação da Soleira do Vertedouro (m)	782,50
Elevação da Crista da Barragem (m)	796,00
NA Máximo Maximorum (m)	787,6
Borda Livre mínima (m)	8,4

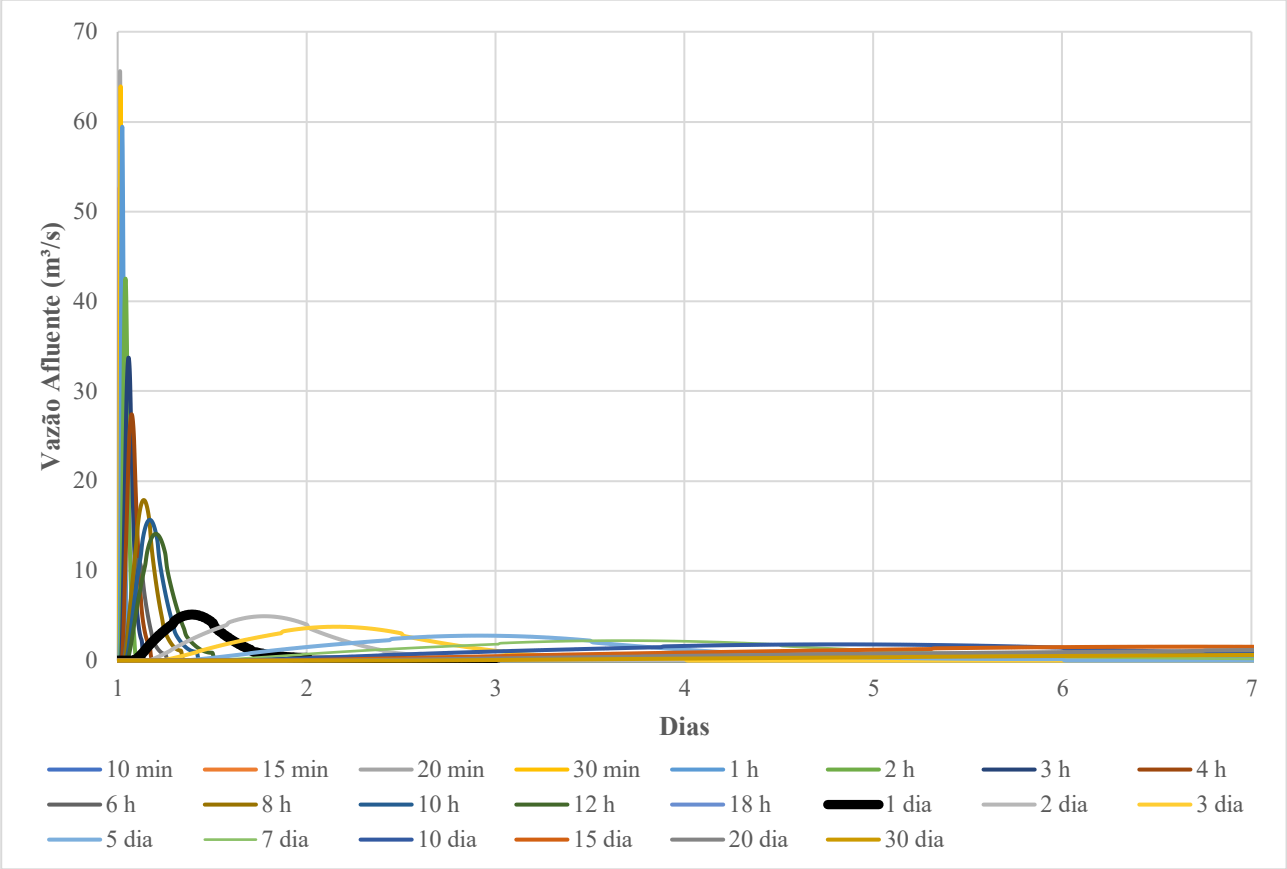


Figura 3 – Hidrogramas afluentes para a duração crítica de chuva associada ao tempo de retorno de 10.000 anos.

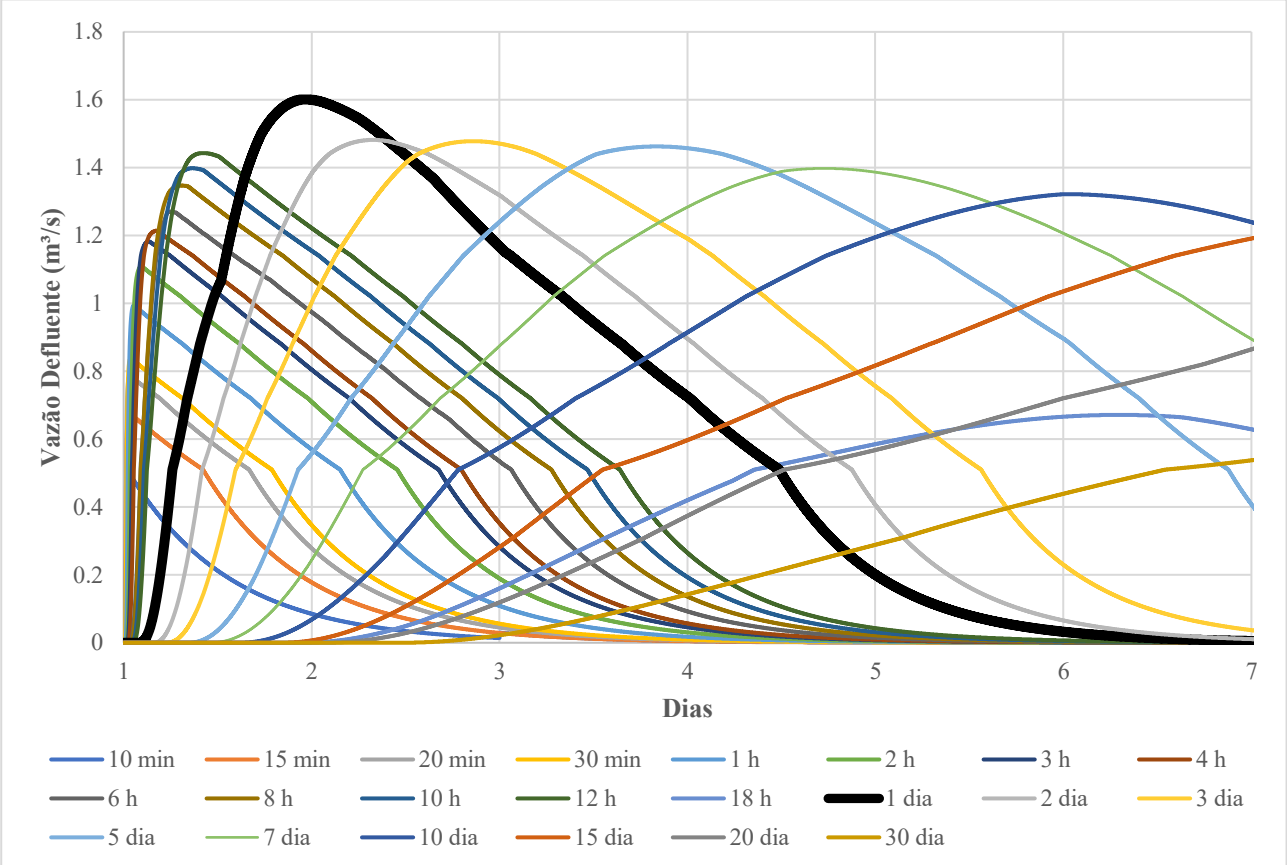


Figura 4 – Hidrogramas defluentes para a duração crítica de chuva associada ao tempo de retorno de 10.000 anos.

A comparação entre os dois procedimentos evidenciou a influência do amortecimento do reservatório no diagnóstico de suficiência hidráulica. Enquanto a verificação simplificada considerou apenas a vazão de pico afluente frente à capacidade de descarga, condição conservadora que desconsidera a variação temporal do hidrograma, o trânsito de cheia avaliou a suficiência a partir do nível máximo atingido no reservatório, incorporando simultaneamente a vazão afluente e as curvas cota-volume e cota-descarga.

Essa distinção é relevante porque a condição crítica para o reservatório não depende apenas da vazão de pico instantânea, mas da combinação entre intensidade, duração e volume total precipitado. Assim, embora o tempo de concentração represente a resposta hidrológica teórica da bacia e seja utilizado na estimativa da vazão pelo método racional, a simulação chuva-vazão indicou que o comportamento crítico do sistema ocorreu em escala temporal superior, com tempo associado ao pico da cheia da ordem de 24 horas. Esse resultado é coerente com a presença de reservação significativa, uma vez que o armazenamento temporário tende a retardar a resposta do sistema e deslocar a análise crítica da vazão instantânea para o nível máximo atingido no reservatório.

Dessa forma, a avaliação hidráulica foi conduzida considerando não apenas a capacidade nominal de descarga do vertedouro, mas também a capacidade do reservatório de transitar a cheia de projeto sem ocorrência de galgamento e com manutenção da borda livre mínima recomendada. Para essa verificação, adotou-se como referência a borda livre mínima de 1,0 m em relação ao nível máximo maximorum, conforme ELETROBRAS (2003) e ANA (2016) para barragens de aterro.

4. CONCLUSÃO

O estudo de caso da Lagoa Maior evidenciou que a consideração do amortecimento do reservatório pode alterar de forma significativa o diagnóstico de suficiência hidráulica de estruturas extravasoras. Enquanto a verificação simplificada por comparação direta de vazões indicou insuficiência da estrutura, a simulação chuva-vazão associada ao trânsito de cheia demonstrou que o reservatório foi capaz de laminar o hidrograma afluente, reduzindo substancialmente a vazão defluente e mantendo o nível máximo atingido abaixo da cota de coroamento, com atendimento ao critério de borda livre mínima adotado.

Esse resultado reforça que, em barragens e reservatórios com capacidade de armazenamento expressiva em relação à bacia contribuinte, a avaliação hidráulica não deve se restringir à comparação entre vazão de pico afluente e capacidade nominal do extravasor. Nesses casos, o nível máximo

atingido durante a passagem da cheia constitui a variável mais representativa para a verificação de segurança, pois incorpora simultaneamente o hidrograma afluente, a curva cota-volume do reservatório e a curva cota-descarga da estrutura extravasora.

Conclui-se, portanto, que a análise simplificada pode ser utilizada como etapa preliminar de triagem, mas não deve ser adotada isoladamente como critério definitivo de suficiência hidráulica em sistemas com reservação relevante. Para barragens de pequeno porte, lagoas urbanas e reservatórios com elevada capacidade de amortecimento, a incorporação do trânsito de cheia permite diagnósticos mais consistentes, tecnicamente fundamentados e proporcionais ao comportamento real da estrutura, contribuindo para decisões de segurança mais adequadas e para a priorização racional de eventuais intervenções.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à G5 Engenharia pelo apoio e incentivo ao aprendizado contínuo, à participação em eventos técnico-científicos e à produção e publicação de estudos e pesquisas.

REFERÊNCIAS

ANA (2016). *"Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens."* Agência Nacional de Águas, Brasília - DF.

BRASIL (2010). Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. "*Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens*." Diário Oficial da União, Brasília - DF, 21 set. 2010.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. "*Applied Hydrology*." New York: McGraw-Hill, 1988. 572 p.

ELETROBRAS (2003). "*Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas*." Centrais Elétricas Brasileiras S.A., Rio de Janeiro - RJ.

KIRPICH, Z.P (1940). "*Time of concentration of small agricultural watersheds*". *Civil Engineering*, v. 10, n. 6, p. 362, 1940

PINHEIRO, A.; NAGHETTINI, M. (1998). "*Regionalização das curvas intensidade-duração-frequência das chuvas intensas na Região Metropolitana de Belo Horizonte*. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*", Porto Alegre, v. 3, n. 3, p. 71–85, 1998.

PORTO, R.M. "*Hidráulica Básica*." 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 1998. 540 p

USACE (2026). "*HEC-HMS Technical Reference Manual*." U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis - CA.