

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DE UM VERTEDOURO UTILIZANDO MÉTODOS ANALÍTICOS, NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Luisa da Cunha Vieira¹; Éricson Rojahn²; Luan Marcos da Silva Vieira³;

Lucas Fontanetti Martins⁴; José Carlos de Melo Bernardino⁵

Abstract: Spillways are essential structures for ensuring the hydrological and hydraulic safety of dams. This study presents the hydraulic assessment of a stepped spillway using analytical, numerical, and experimental methods. The objective was to analyse the discharge curve and the flow behaviour under critical conditions, such as the flow rate associated with the Probable Maximum Precipitation (PMP), considering variables such as water depth, velocity, flow regime, energy dissipation, and cavitation risk. The assessed spillway is a large-scale structure with a rectangular inlet and two stepped chute sections. The discharge curve was initially determined using theoretical equations, followed by numerical simulations in HEC-RAS and validation through a physical model at a 1:40 scale. The results indicated that the theoretical equation with a discharge coefficient of 1.5 best reproduced the discharge curve obtained from the physical model. The numerical model proved to be sensitive to the contraction coefficient, with a value of 0.8 providing the best agreement with experimental data. The analysis of the stepped sections revealed a skimming flow regime, with high energy dissipation (approximately 83%) and no significant cavitation risks, although the physical model indicated negative pressures at the toe of the chute. The comparison among the three methods showed good agreement in the results, highlighting the importance of a combined approach to reduce uncertainties and increase the reliability in the design of complex hydraulic structures such as stepped spillways.

Resumo: Vertedouros são estruturas fundamentais para a garantia da segurança hidrológica e hidráulica de barragens. Este estudo apresenta a avaliação hidráulica de um vertedouro com trechos em degraus, utilizando métodos analíticos, numéricos e experimentais. O objetivo foi analisar a curva de descarga e o comportamento do escoamento durante a passagem da cheia associada à Precipitação Máxima Provável (PMP), considerando variáveis como altura da lâmina d'água, velocidade, tipo de escoamento, dissipação de energia e risco de cavitação. O vertedouro avaliado é uma estrutura de grande porte com emboque retangular e dois trechos em degraus. A curva de descarga foi inicialmente obtida por equações teóricas, seguida por simulações numéricas unidimensionais em regime permanente e validação por modelo físico em escala 1:40. Os resultados indicaram que a equação teórica com coeficiente de descarga 1,5 foi a que melhor reproduziu a curva de descarga obtida no modelo físico. O modelo numérico foi sensível ao coeficiente de contração, sendo 0,8 o valor que gerou melhor concordância com os dados experimentais. A análise dos trechos em degraus mostrou escoamento do tipo *skimming flow*, com alta dissipação de energia (aproximadamente 83%) e sem riscos relevantes de cavitação, embora o modelo físico tenha indicado pressões negativas no término da escada. A comparação entre os três métodos revelou boa concordância dos resultados, destacando-

1) BVP Geotecnia e Hidrotecnia, Rua Tomé de Souza, 616 – Savassi, Belo Horizonte – MG, (31) 99926-3171, luisa.vieira@bvp.eng.br

2) ER Projetos de Engenharia, Lajeado – RS, ericson.rojahn@gmail.com

3) Belo Horizonte – MG, (31) 99224-2028, luan.msv@gmail.com

4) Universidade de São Paulo (USP), Rua da Reitoria, 374 – Butantã, São Paulo – SP, (11) 97430-1900, lucas.fontanetti.martins@usp.br

5) Universidade de São Paulo (USP), Rua da Reitoria, 374 – Butantã, São Paulo – SP, (11) 99151-5173, jcarlosmbernardino@usp.br

se a importância do uso combinado das abordagens para reduzir incertezas e aumentar a confiabilidade no dimensionamento de estruturas hidráulicas complexas como vertedouros com trechos em degraus.

Palavras-Chave – Curva de descarga. Vertedouro em degraus. Modelos hidráulicos.

INTRODUÇÃO

Vertedouros são estruturas destinadas ao vertimento seguro do excesso de água em reservatórios, garantindo que não ocorra gálgamento do barramento (Matos *et al.*, 2022). O seu correto dimensionamento hidráulico é fundamental para garantir a segurança e a eficiência operacional de barragens.

Vertedouros com trechos em degraus são amplamente empregados por sua elevada capacidade de dissipação de energia, diminuindo as velocidades do escoamento e, portanto, a possibilidade de erosões na restituição ao leito natural e reduzindo a necessidade de estruturas dissipadoras adicionais (Chow, 1959; Chanson, 1994). O uso dos degraus se dá devido às grandes velocidades atingidas pelo escoamento em determinadas inclinações, que podem causar danos ao material utilizado na estrutura de drenagem (Chanson, 2002). O escoamento nesses trechos, a partir de determinada vazão, frequentemente é denominado como *skimming flow*, escoamento aerado altamente turbulento e com significativa dissipação de energia, caracterizando-se pela formação de vórtices na cavidade limitada pela superfície do degrau e o pseudofundo, o que fornece sustentação ao fluxo deslizante (Chanson, 1994).

Atualmente, existem diferentes métodos para o dimensionamento hidráulico de vertedouros e seus componentes. Os métodos analítico-teóricos são baseados em premissas e hipóteses físicas simplificadas sobre o comportamento do escoamento, e por isso geralmente fornecem apenas estimativas iniciais ao dimensionamento, podendo apresentar maior desvio em relação às condições reais. Podem ser complementados com métodos analítico-empíricos, que frequentemente se baseiam em experimentos laboratoriais, passíveis de serem transpostos a condições hidráulicas análogas, e capazes de fornecer resultados mais representativos, desde que as faixas de validade das equações sejam respeitadas. Métodos denominados numéricos compreendem um sistema de equações fundamentadas em teoria matemática e que são aplicadas a um protótipo virtual. Existem modelos numéricos mais simples, como os unidimensionais, e os mais complexos, como os bidimensionais e tridimensionais. A depender do fenômeno e da estrutura a ser avaliada, pode-se exigir uma capacidade computacional elevada. Já os métodos experimentais dependem de modelos físicos construídos em escala real ou reduzida e costumam ter custos elevados, apesar de apresentarem boa qualidade dos resultados quando o modelo representa bem o projeto. Em estudos que envolvem a modelagem híbrida, os modelos físicos costumam ser utilizados para calibração de modelos numéricos, especialmente em situações em que efeitos como a aeração e a dissipação de energia não são bem capturados pelas demais abordagens. Por fim, entende-se que a utilização integrada de diferentes abordagens possibilita a redução de incertezas garantindo maior segurança aos projetos de estruturas hidráulicas.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a curva de descarga e o comportamento do escoamento (altura da lâmina d'água, velocidade, tipo de escoamento, capacidade de dissipação de energia e riscos de cavitação) ao longo de um vertedouro, que possui um trecho em degraus, comparando os resultados obtidos por meio de métodos analíticos, numéricos e experimentais. Tendo em vista a complexidade dos fenômenos hidráulicos envolvidos, este trabalho

objetiva apenas apresentar aspectos gerais de um estudo de caso, sem aprofundar ou explicitar detalhes teóricos, que podem ser consultados na bibliografia especializada.

METODOLOGIA

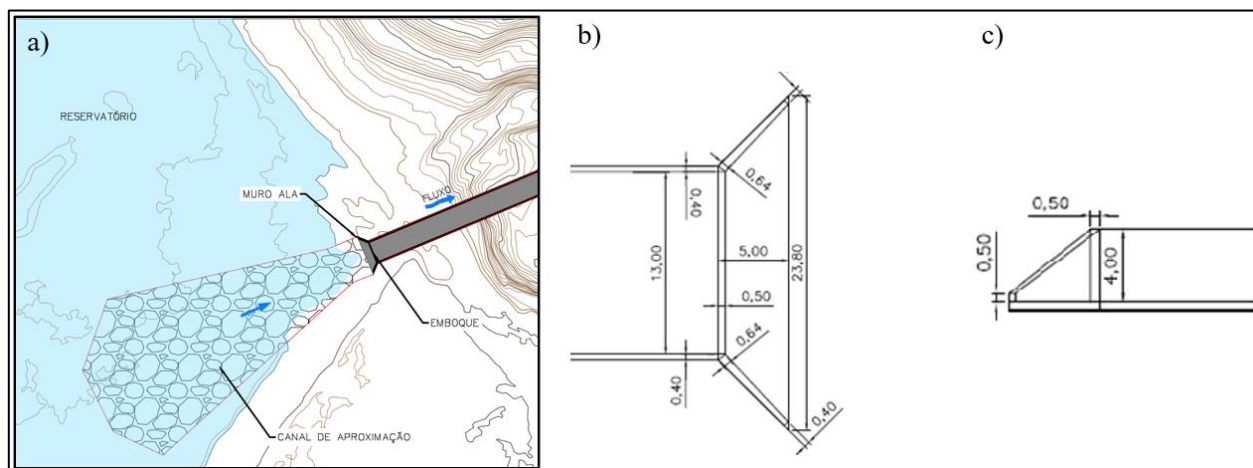
Caracterização do vertedouro

O vertedouro estudado é uma estrutura de grande porte, com comprimento total de 1200 m, do tipo emboque de canal revestido em concreto. Ele é composto por um emboque, seguido por um canal em seção transversal retangular, subdividido em 4 trechos: o primeiro, em calha lisa, possui, inicialmente, 13 m de largura e uma transição horizontal reduzindo a seção para 11 m de largura; o segundo, em degraus; o terceiro, em calha lisa com uma nova redução horizontal de 2 m; o quarto, em degraus, seguido de uma bacia de dissipação. Neste trabalho, foram avaliadas as condições de funcionamento hidráulico do emboque e do primeiro trecho em degraus, que possui comprimento suficientemente longo para estabelecer regime uniforme, frente à passagem da vazão associada à Precipitação Máxima Provável (PMP).

A Figura 1a mostra, em planta, o emboque da estrutura objeto deste estudo. Nesta mesma figura, podem ser observados o canal de aproximação revestido de enrocamento argamassado, a montante do emboque, e a lâmina d'água equivalente à cheia associada à PMP. O emboque da estrutura é retangular, com largura de 13 m, altura de 4 m e situado na elevação 1215 m. A estrutura foi dimensionada para uma vazão de projeto de 150 m³/s (PMP). No emboque, existem muros ala com abertura de 45° e comprimento de 5 m, cujos detalhes podem ser observados na Figura 1b e 1c.

O primeiro trecho em degraus, com altura das paredes de 2,5 m (ortogonal ao pseudofundo), possui declividade de 45,45% e desnível de 70 m com. Os degraus possuem patamar de 1,10 m e espelho de 0,50 m (140 degraus).

Figura 1 – Emboque do vertedouro em planta (a) e detalhe do muro ala em planta (b) e em perfil (c). Dimensões: metros



Métodos analíticos

A curva de descarga do emboque foi determinada, primeiramente, por meio da equação:

$$Q = C_d \cdot L \cdot H^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

Na qual: Q = vazão (m³/s); C_d = coeficiente de descarga, que varia conforme o tipo de soleira vertente (m^{0,5}/s); L = largura geométrica da soleira vertente (m); H = carga específica de montante, dentro do reservatório, acima da crista vertente, (m).

Admitindo-se que não ocorrem perdas de carga entre o reservatório e a seção de lâmina crítica e que ocorre distribuição hidrostática das pressões, pode ser demonstrado, por balanço de energia, que $C_d = (2/3)^{3/2} \sqrt{g} \approx 1,7 \text{ m}^{0,5}/\text{s}$, valor frequentemente utilizado, conforme Pinheiro (2011), para soleiras espessas. Se existirem perdas de carga ou não linearidade do campo de pressões, então C_d tende a se afastar desse valor. Para a estrutura estudada, os valores de $1,7 \text{ m}^{0,5}/\text{s}$ e $1,5 \text{ m}^{0,5}/\text{s}$ foram considerados — esse segundo baseando-se no fato de que, para a estrutura estudada, a lâmina de água sofre apenas contração lateral no emboque, sem efeito significativo de alteração no campo de pressões. Nota-se que o valor de $1,5 \text{ m}^{0,5}/\text{s}$ é cerca de 12% inferior a $1,7 \text{ m}^{0,5}/\text{s}$, o que se justifica pelo arranjo geométrico do emboque, em que os muros de aproximação não fornecem uma transição suave ao escoamento (como pode ser conferido na Figura 1), resultando em uma maior perda de energia.

O dimensionamento hidráulico do trecho em degraus foi realizado utilizando o software SisCCoH (versão 1.0), desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (EE-UFG) e pela empresa Pimenta de Ávila Consultoria. A metodologia de cálculo adotada pelo SisCCoH, aplicável ao trecho em degraus em tema, fundamenta-se na publicação de Ohtsu *et al.* (2004).

Métodos numéricos

Foram desenvolvidos dois modelos numéricos unidimensionais no HEC-RAS (versão 5.0.3), operando em regime permanente: um para o emboque e outro para o trecho em degraus. O software utiliza o *Standard Step Method* (Chow, 1959), baseando-se nos princípios de conservação de massa, de balanço de energia e de *momentum*, admitindo a hipótese de distribuição hidrostática de pressões. No presente estudo, um modelo de tipo unidimensional foi adotado tendo em vista que o comportamento do escoamento é essencialmente de direção única, o que é suficientemente representativo para os propósitos deste trabalho.

Para o emboque, em que a declividade de fundo é constante e pequena (0,001 m/m), a hipótese de distribuição hidrostática das pressões é suficientemente representativa, já que não ocorrem variações expressivas e abruptas da elevação do fundo, de modo a que as linhas de corrente pudessem ser flexionadas e aceleradas verticalmente. Para o trecho em degraus, no entanto, a declividade de fundo acentuada (de 24,4°, ou seja, $\cos^2(24,4^\circ) \approx 0,83$) desvia a distribuição de pressões, ocasionando lâminas de água ligeiramente menores que as reais (implicando, portanto, em maiores velocidades médias). Mesmo assim, o uso do HEC-RAS no trecho em degraus torna-se importante para confrontação com os resultados do SisCCoH e do modelo físico.

No HEC-RAS, a perda de carga por atrito na fronteira parede-fluido é computada pela equação de Manning. Na estrutura estudada, adotou-se um coeficiente igual a $0,014 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ dentro do canal, nos trechos em calha lisa, os quais são revestidos em concreto, conforme citado anteriormente, e igual a $0,030 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ no canal de aproximação, cujo revestimento é de enrocamento argamassado. Para o trecho em degraus, o coeficiente de rugosidade de Manning adotado - $0,0438 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ - foi estimado de acordo com a equação apresentada por Tozzi (1992), através da seguinte relação:

$$n = \frac{1}{k^{1/6}} \quad (2)$$

Na qual: n = coeficiente de rugosidade de Manning para o trecho em degraus ($\text{m}^{-1/3}\text{s}$); k = altura de rugosidade equivalente do degrau (m).

Para a avaliação do emboque, o modelo contou com seis seções principais para representação do sistema. A seção 6, mais a montante, representa o reservatório; a seção 5 representa o início do

canal de aproximação; a seção 4 representa o início do estreitamento no canal de aproximação; a seção 3 representa o início do muro de aproximação; a seção 2 indica o emboque; e, por fim, a seção 1 representa o final do trecho de interesse, já dentro do canal. As seções foram interpoladas de 10 em 10 metros, com exceção dos trechos entre as seções 4 e 2, onde foi utilizado um intervalo de interpolação de 1 metro. As condições de contorno inseridas na seção de montante e de jusante foram as profundidades normais calculadas, respectivamente, com a declividade de 0,001 m/m, representando o reservatório, e com a declividade de 0,005 m/m (declividade supercrítica), representando o primeiro trecho em calha lisa. No entanto, devido ao trecho em calha lisa ter declividade supercrítica, a condição de contorno de jusante acaba sendo meramente informativa, não tendo impacto nos resultados. A fim de construir a curva chave, foram definidas as vazões de referência: 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150, 180 m³/s.

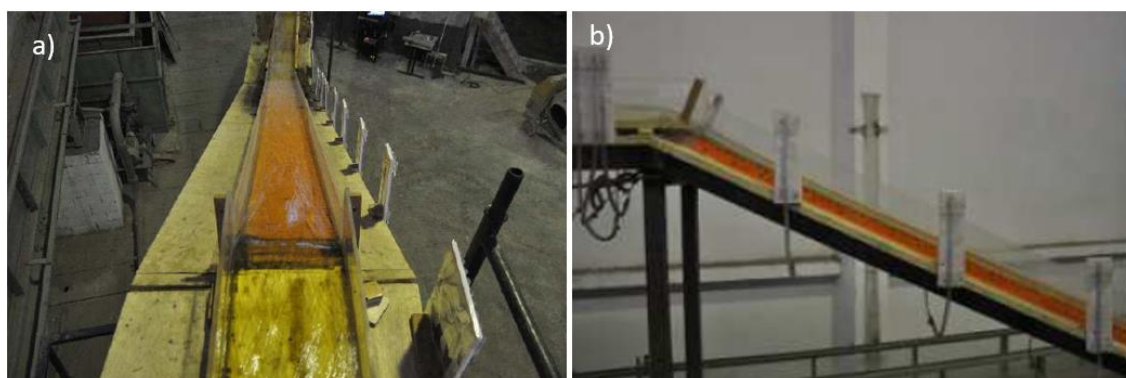
O modelo do trecho em degraus contou com 58 seções para representação do sistema e as seções foram interpoladas de 3 em 3 metros. As condições de contorno inseridas na seção de montante e de jusante foram as lâminas normais calculadas com as respectivas declividades de fundo: 0,005 m/m a montante da escada e 0,006 m/m a jusante (essa segunda sendo meramente informativa, já que o escoamento já a adentra em regime supercrítico). A vazão simulada em regime permanente foi a vazão de projeto (150 m³/s).

Importante observar que para o emboque foram simuladas diversas vazões, a fim de se ter uma curva de descarga bem definida, enquanto para o trecho em degraus apenas uma vazão foi simulada, para a qual se dispunha de leituras do modelo físico.

Métodos experimentais

Foram realizados ensaios laboratoriais em um modelo físico reduzido (Figura 2) construído com o critério de semelhança de Froude, em escala geométrica 1:40, considerando os efeitos gravitacionais como preponderantes. No trecho em degraus, os dados de profundidade, pressão média e velocidades médias foram coletados no meio da seção a cada 20 m (em valor de protótipo), no meio do patamar do degrau, de maneira a se ter uma linha d'água suficientemente representativa e adequada aos propósitos do presente estudo. Também foram medidas pressões instantâneas, por meio de três transdutores, na região logo a jusante da escada, com distâncias de 4 m, 5 m e 7,5 m a partir do término da escada. Para os ensaios no emboque, foi utilizado um único ponto a montante para medição do nível de água. A definição da curva de descarga, da linha d'água, das velocidades e da capacidade de dissipação das escadas são alguns dos objetivos do modelo físico.

Figura 2 – a) Vista superior e b) lateral da primeira metade do primeiro trecho em degraus – modelo físico



Para os propósitos do presente estudo, a escala 1:40 é satisfatória. De acordo com Novakoski *et al.* (2018), modelos com escala geométrica dessa ordem não são capazes de representar corretamente o fenômeno da aeração, o qual pode ocorrer nos trechos em degraus. Para uma melhor

representação desse fenômeno, Al-Ta'i, (2010) recomenda a adoção de escalas de 1:10 ou até 1:15, pelo menos nos trechos em degraus, uma vez que os efeitos de viscosidade e da turbulência são fundamentais para a formação do escoamento bifásico ar-água. Sendo assim, a estimativa do grau de aeração do escoamento, da lâmina de água e das velocidades foram também realizadas através do SisCCoH, já que, para esse tipo de estrutura, o software se baseia nos experimentos de Ohtsu *et al.* (2004).

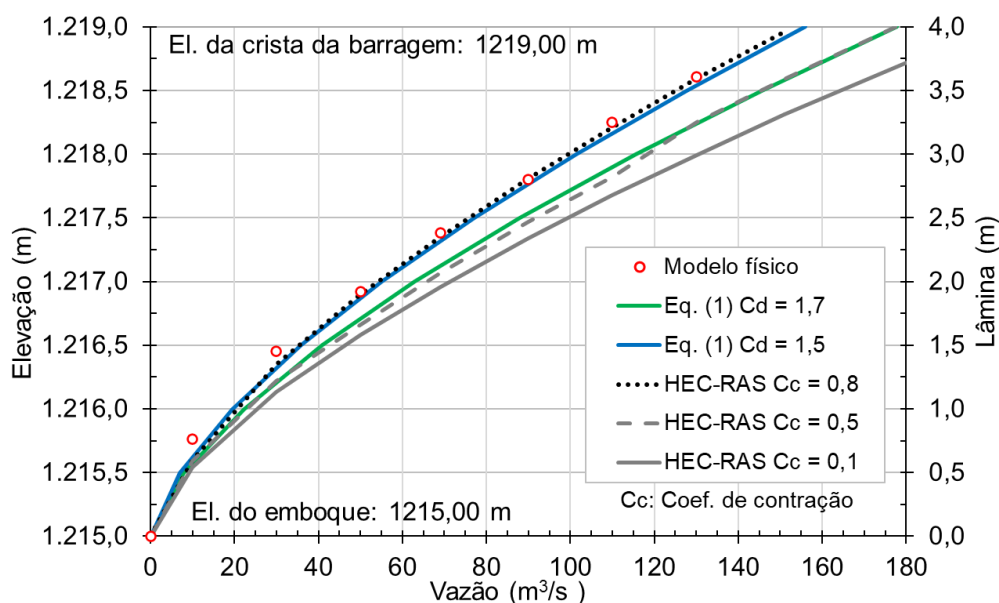
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Curva de descarga

Para a vazão de projeto, a partir da simulação do escoamento no canal por meio do modelo numérico, o regime de escoamento a montante do emboque ocorre na condição subcrítica. O controle do escoamento (seção crítica) está no emboque do canal, com perda de carga mais significativa nessa localidade. Não foi verificado extravasamento ao longo do trecho.

Na Figura 3, foram plotadas todas as curvas de descarga para avaliação. Observa-se, a partir da análise gráfica, que a curva de descarga que mais se aproximou daquela obtida por meio do modelo físico (referência) foi a curva teórica com o coeficiente de descarga igual a 1,5, demonstrando que o arranjo geométrico do emboque (em especial seus muros de aproximação) não fornece uma transição suave ao avanço do escoamento, resultando em uma maior perda de energia.

Figura 3 – Curvas de descarga do emboque.



Contrações e expansões do fluxo ao longo do canal podem causar perdas de carga significativas entre duas seções. No caso da estrutura em estudo, nas proximidades do emboque, ocorre uma contração relevante, entre o final do canal de aproximação e o início do emboque (seções 4 a 2). Por esse motivo, o coeficiente de contração no modelo numérico foi calibrado de forma a se obter uma curva de descarga que mais se aproximasse da curva de descarga do modelo físico.

De acordo com o Manual de Referência de Hidráulica do HEC-RAS (USACE, 2016), é comum adotar os coeficientes de contração de 0,1 para transições graduais (esse é o valor padrão adotado no HEC-RAS) e de 0,6 para transições abruptas. Na estrutura em estudo, entende-se que a transição é abrupta e o coeficiente de contração foi sendo variado até que fosse possível obter uma curva próxima

da encontrada pelo modelo físico. O coeficiente de contração de 0,8 permitiu alcançar resultados bastante próximos aos do modelo físico.

Trecho em degraus

A partir da vazão de projeto (150 m³/s) e da geometria dos degraus, verificou-se, no software SisCCoH, que o escoamento é do tipo *skimming flow*, ou seja, ocorre o deslizamento do fluxo sobre turbilhões. Para o trecho em regime quase-uniforme, a velocidade do escoamento considerando apenas a coluna de água foi de 14,9 m/s e, considerando a mistura ar-água, foi de 11,2 m/s, tendo em vista que a concentração média de ar apontada pelo software foi de 0,25. Para essa concentração média e no mesmo trecho de regime quase-uniforme, obteve-se uma profundidade aerada y_{90} de 1,22 m, apontando para a necessidade de uma altura de parede mínima (H_w) ortogonal ao pseudofundo de 1,70 m para atender a recomendação de Othsu *et al.* (2004) de $H_w = 1,4 \cdot y_{90}$.

No modelo físico, também foi verificado o *skimming flow* para a vazão de projeto. A profundidade do escoamento medida em modelo foi de aproximadamente 1,2 m, que, conforme observado por Rojahn *et al.* (2022), pode ser suposta como não aerada por fatores de segurança. Assim, é possível afirmar que a profundidade aerada y_{90} pode ser corrigida para 1,6 m, resultando em $H_w = 2,25$ m. Como a parede adotada, nesse trecho, é de 2,50 m, observa-se uma borda livre adequada à segurança da estrutura contra o extravasamento.

A respeito da posição do início da aeração, o software SisCCoH indicou a posição relativa ao degrau 34 (37 m da crista da escada), resultado semelhante ao que foi visualmente constatado no modelo físico durante o ensaio, como será discutido adiante. Por fim, os resultados não apontam para o risco de cavitação, uma vez que a velocidade no início da aeração ($\approx 11,49$ m/s) é inferior à velocidade crítica de cavitação no início da aeração ($\approx 17,8$ m/s), conforme metodologia proposta por Gomes (2006) e incorporada ao software SisCCoH.

Verificou-se, no modelo numérico, que as velocidades máximas alcançam valores de até 13,8 m/s, enquanto no início da escada alcança 6,1 m/s. Não houve transbordamento de água nas paredes em nenhum trecho simulado, embora seja importante ressaltar que o modelo numérico não representa o fenômeno da aeração. Além disso, o modelo numérico utilizado admite distribuição hidrostática das pressões, o que implica em profundidades do escoamento ligeiramente menores do que as reais (levando, portanto, a maiores velocidades médias). Assim, os resultados do modelo numérico nesse trecho são meramente indicativos da adequabilidade dos demais métodos utilizados.

A dissipação de energia na escada foi avaliada pela diferença na elevação da linha de energia entre montante e jusante, obtendo-se um percentual de dissipação de 85,66% no modelo numérico e de 89,75% no software SisCCoH, considerando profundidade e velocidade obtidas pela mistura ar-água (Tabela 1). A partir das leituras no modelo físico, obteve-se um percentual de dissipação de 82,85%, tomando por base os valores de velocidade média e pressão medidos por micromolinetes e piezômetros instalados no meio da seção a montante e a jusante do trecho em degraus. O valor de dissipação encontrado se aproxima daquele obtido por meio do modelo numérico 1-D (85,66%) e também dos valores encontrados por Chanson (1994) *apud* Conterato (2014) e por Sanagiotto (2003) ($\approx 84\%$). Esse valor de dissipação de energia é ligeiramente superior àquele encontrado com uso da metodologia de Conterato (2014) ($\approx 75\%$) e ligeiramente inferior ao valor encontrado pelo SisCCoH (89,75%).

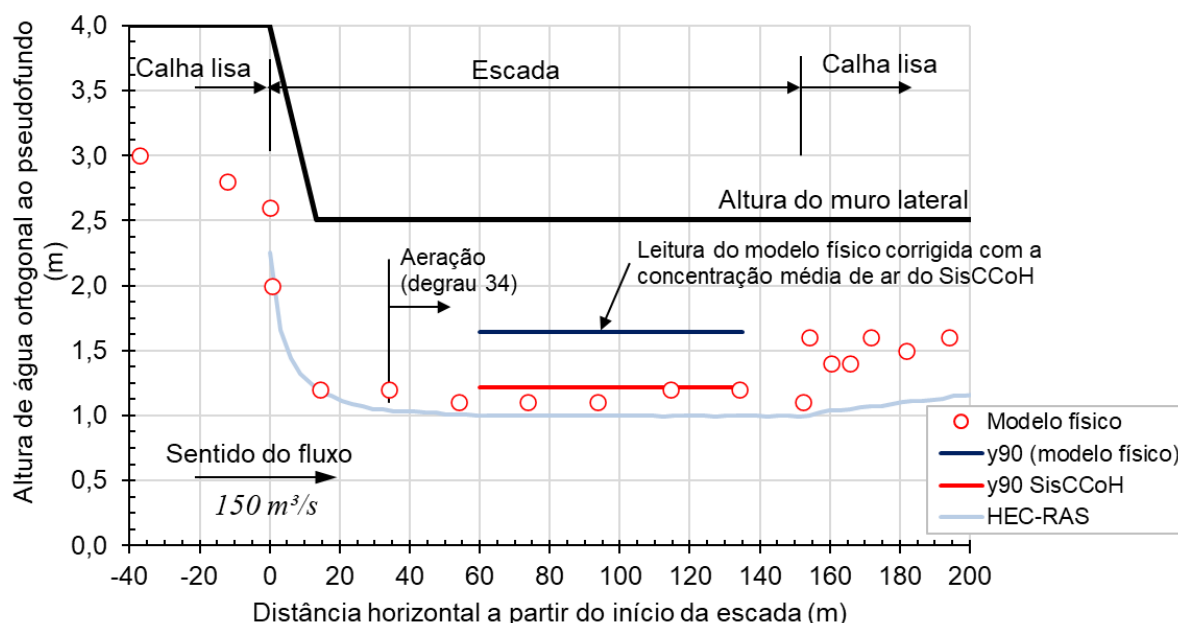
A Figura 5 mostra os resultados de linha d'água, velocidades e pressões ao longo do trecho em degraus obtidos por meio das ferramentas utilizadas no estudo.

A vazão específica observada é de $13,64 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, valor esse considerado no limite com relação aos danos à estrutura por cavitação, de acordo com os estudos realizados por Tozzi (1992), Elviro e Mateos (1996), Amador (2005), Gomes (2006), Novakoski *et al.* (2018) e Endres *et al.* (2019).

Tabela 1 – Resultados da análise de dissipação de energia nos degraus

Modelo numérico		SisCCoH		Modelo físico	
Dissipação de Energia (m)	Dissipação de energia (%)	Dissipação de energia (m)	Dissipação de energia (%)	Dissipação de energia (m)	Dissipação de energia (%)
63,51	85,66	66,68	89,75	62,19	82,85

Figura 5 – Altura de água ortogonal ao pseudofundo na escada



No entanto, como o escoamento já entra na escada com uma velocidade elevada ($6,9 \text{ m/s}$), essa condição inicial pode ser favorável à ocorrência de danos por erosão/cavitação antes que o escoamento fique aerado. Na escala 1:40, a aeração não é bem representada por conta de efeitos de escala e a incorporação de ar no modelo tende a ser menor do que no protótipo. Sendo assim, é possível que a aeração se inicie em seção a montante do que está indicado na Figura 5, reduzindo os riscos de danos. Avaliações mais precisas podem ser feitas em modelos em escala 1:10 ou até 1:15. No caso em estudo, as verificações utilizando o SisCCoH sugeriram uma seção de início de aeração concordante àquela visualizada no modelo físico. Assim como verificado no SisCCoH, o modelo físico apontou início da aeração no degrau 34, sugerindo posições de afloramento da camada turbulenta suficientemente aderentes entre si.

O modelo também indicou pressões negativas no ponto de impacto do jato no pé da escada, decorrente da reação do piso ao impacto do escoamento, devido à mudança brusca da declividade de fundo, podendo ser um indicativo de risco de cavitação nessa localidade. Mesmo assim, é esperado que no término da escada o escoamento já esteja plenamente aerado, diminuindo ou até eliminando o risco de danos causados por eventual cavitação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No emboque da estrutura, a curva de descarga obtida pela Eq. (1), adotando-se o coeficiente de descarga de 1,5, foi a que mais se aproximou daquela obtida pelo modelo físico, considerado aqui como referência, evidenciando perdas de carga devido aos muros de aproximação do emboque.

O modelo numérico apresentou expressiva sensibilidade às variações no coeficiente de contração, sendo que a adoção de um coeficiente de 0,8 resultou em níveis de água aderentes ao modelo físico.

No trecho em degraus, os resultados dos três métodos se aproximaram de forma geral em termos de linha d'água e velocidades, embora o modelo numérico tenha caráter aproximativo de representação das características do escoamento. Em nenhum caso aponta-se risco de cavitação. Além disso, para todas as análises, não foi observado transbordamento de água no trecho analisado.

Apesar das verificações via SisCCoH e do modelo físico mostrarem que não há risco de cavitação ao se comparar a vazão específica do canal em estudo com as referências na literatura, é pertinente ter atenção quanto ao risco de cavitação, sobretudo no pé da escada, onde o modelo experimental indicou pressões negativas. Porém, é esperado que no término da escada o escoamento já esteja plenamente aerado, diminuindo ou até eliminando o risco de danos causados por eventual cavitação (Matos *et al.*, 2022). Para maior confiabilidade do grau de aeração, seriam necessários estudos em modelo físico de escala 1:10 ou, pelo menos, 1:15.

Verificou-se aderência entre o ponto de início de aeração (afloramento da camada turbulenta) visualizada no modelo físico e aquela fornecida pelo SisCCoH. Os modelos numérico e físico apresentaram resultados de dissipação de energia similares e coerentes com os encontrados na literatura como os de Chanson (1994) *apud* Conterato (2014) e os de Sanagiotto (2003).

Por fim, conclui-se que a utilização de métodos complementares contribui para uma avaliação mais completa e, consequentemente, para maior segurança no dimensionamento de vertedouros e outras estruturas hidráulicas.

REFERÊNCIAS

- AL-TA'I, M. A. (2010). *Hydraulic model investigation of different configurations of stepped spillway*. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) – College of Engineering, University of Baghdad.
- AMADOR, A. (2005). *Comportamiento Hidráulico de los Aliaderos escalonados em presas de hormigón compactado*. Tese de doutoramento. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona.
- AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. (2009). "Developing Flow Region and Pressure Fluctuations on Steeply Sloping Stepped Spillways". *Journal of Hydraulic Engineering*, Inglaterra.
- BAPTISTA, M; LARA, M. (2014). *Fundamentos de Engenharia Hidráulica*. Belo Horizonte: UFMG, 3ed, 477 p.
- CHANSON, H. (2002). *The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways*. Queensland: Ed. A. A. Balkema Publishers.
- CONTERATO, E. (2014). *Determinação de critérios de dimensionamento de soleira terminal em bacia de dissipação a jusante de vertedouro em degraus*. 156 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ELVIRO GARCIA, V.; MATEOS IGUÁCEL, C. (1996). *Aliviaderos: funcionamiento hidráulico*. III Curso de presas de hormigón compactado, Madri, 17 e 18 de setembro.

ENDRES, L. A. M.; SCHUMACHER, A.; CANELLAS, A. V. B., DA SILVA, F. A. (2019). “*Delimitação de vazões em função de pressões extremas sobre uma calha de vertedouro em degraus*” in Anais do XXXII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Salvador, 2019.

GOMES, J. (2006). *Campo de Pressões: Condições de Incipiência à Cavitação em Vertedouros em Degraus com Declividade 1V:0,75H*. 173 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MATOS, J.; NAKOSKI, C. K.; FERLA, R.; MARQUES, M. G.; PRÁ, M. D.; CANELLAS, A. V. B.; TEIXEIRA, E. D. (2022). “*Extreme Pressures and Risk of Cavitation in Steeply Sloping Stepped Spillways of Large Dams*”. Water, v 14, 306.

NAKOSKI, C. K.; PRIEBE, P. S.; BRANDÃO, A. V.; SARAIVA, L. S.; DAI PRÁ, M.; SANAGIOTTO, D. G.; OSMAR, F. M.; PINTO, L. C. P. S.; MARQUES, M. G.; MATOS, J. (2018). “*Extreme negative pressures and cavitation tendency on steeply sloping stepped spillways*” in Anais do Third International Dam World Conference, Foz do Iguaçu, 2018.

OHTSU, I.; YASUDA, Y.; TAKAHASHI, M. (2004). “*Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels*”. Journal of Hydraulic Engineering, v. 132, 5, pp 860-869.

PINHEIRO, M. C. (2011). *Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração*. Porto Alegre: ABRH, 308 p.

SANAGIOTTO, D. (2003). *Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H*. 118 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ROJAHN, É; MARTINS, L. F.; VIEIRA, L. C.; RIUL; M.; BERNARDINO, J. C. M.; BRASIL; L. S. S.; MARQUES, M. G (2022). “*Comparação de lâmina de água de modelo físico 1:40 frente a metodologias de previsão de aeração em calhas em degraus*” in Anais do XX Congresso Latino Americano de Hidráulica, Foz do Iguaçu, 2022.

TOZZI, M. J. (1992). *Caracterização/Comportamento de Escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus*. 302 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à BVP Geotecnia e Hidrotecnia e à Universidade de São Paulo (USP) por disponibilizarem as informações necessárias e o suporte técnico para o desenvolvimento deste trabalho.