ESTUDO DA MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DO ESCOAMENTO EM MODELOS FÍSICOS DE VERTEDORES TIPO TULIPA

Palavras-Chave: Vertedor Tulipa, Modelo Físico, Revisão Sistemática

Autores(as):

THAUANE ALVES COSTA, FECFAU - UNICAMP

Prof(ª). Dr(ª). LAURA MARIA CANNO FERREIRA FAIS (orientadora), FT - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Em uma barragem, o vertedor é a estrutura encarregada por escoar, de forma segura, as vazões de enchente para um ponto a jusante. Trata-se de um elemento fundamental para garantir a integridade da barragem, devendo ser projetado com capacidade adequada para liberar o volume excedente durante eventos de cheia. Existem vários tipos de vertedores, sendo estes o vertedor extravasor (dotado ou não de comporta), o vertedor labirinto, vertedor orifício, sifão, tulipa, dentre outros.

O vertedor tipo tulipa é construído no interior do reservatório da barragem, e, por isso, é uma boa opção quando não há espaço suficiente no corpo da barragem, ou no caso de barragens de terra e/ou enrocamento. Ele é composto por uma soleira vertente conectada a um poço vertical, seguido por uma curva, geralmente de geometria circular, que conduz a um túnel ou galeria de descarga. Cada uma dessas partes tem aspectos de projeto particulares e devem ser dimensionadas separadamente, cada qual com seu critério de projeto. Porém, com a utilização de modelos físicos e o avanço das técnicas computacionais, é possível modelar o escoamento de cada parte e dimensionar adequadamente este tipo de vertedor. Detalhes sobre o dimensionamento do vertedor tulipa podem ser vistos em Fais (2007).

Este tipo de vertedor pode operar em duas condições: livre, quando o controle do escoamento ocorre na crista; ou afogado, quando parte do sistema encontra-se submersa. Caso o objetivo seja escoar todo o excesso hídrico sem permitir que a água ultrapasse a crista da barragem, o vertedor deve operar livre em toda a faixa de vazões. Por outro lado, se a finalidade for restringir a vazão a jusante, o vertedor deve ser projetado para funcionar livre sob pequenas cargas e afogado sob grandes cargas.

Segundo Shinbein (2019), devido à preocupação com a entrada de ar, os vertedores tipo tulipa são menos implantados do que outras formas de controle de fluxo. Como o escoamento no vertedor tulipa tem suas características particulares e diferentes tipos de funcionamento, é necessário que seja feito estudo em modelo, tanto físico como matemático, já que a presença de elementos como dispositivos antivórtices, aeradores e comportas podem provocar aumento ou diminuição no coeficiente de descarga

do vertedor, consequentemente na vazão descarregada. Fais (2007) apresentou uma revisão bibliográfica dos critérios de projeto de cada uma das partes do vertedor tulipa.

Vários estudos vêm sendo realizados, tanto em modelos físicos, como matemáticos, para avaliar o escoamento em um vertedor tipo tulipa; são avaliadas desde questões relacionadas à sua capacidade de descarga, arraste de ar, condições de formação de vórtices, otimização das dimensões geométricas, até problemas de descarga de sedimentos em suspensão através do vertedor.

Nesse sentido, a quantidade de arraste de ar é importante para estruturas com poços verticais, como é o caso do vertedor tipo tulipa, uma vez que a presença de ar no escoamento diminui a vazão líquida máxima, que por sua vez é importante para o dimensionamento das estruturas à jusante destes mesmos poços (Fais, 2007). Para além disso, de forma mais geral, a presença de ar em sistemas hidráulicos é maléfica para estruturas hidráulicas, pois pode gerar distúrbios no escoamento, o que pode gerar vibrações, danos estruturais e instabilidade da superfície da água (Abdul-Sahib & Alfatlawi, 2024).

Assim, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão sistemática dos estudos mais recentes sobre medição em modelo físico, de parâmetros do escoamento de um vertedor tipo tulipa, com enfoque na vazão de ar arrastado.

METODOLOGIA:

A metodologia deste trabalho consiste na revisão bibliográfica de publicações buscadas no Portal de Periódicos CAPES/SCOPUS, SciELO, Repositórios Institucionais, Biblioteca Digital de Teses e Dissertações: BDTD e MDPI - *Publisher of Open Access Journals*. Além dos Portais de Periódicos, livros serão utilizados para verificação de conceitos, disponíveis em acervos online e na Biblioteca de Arquitetura e Engenharia da Universidade Estadual de Campinas.

Serão considerados estudos realizados nos últimos 10 anos (2014-2024), em modelo físico do vertedor tipo tulipa, e será feita a avaliação de instrumentos e técnicas de medição de parâmetros importantes do escoamento, especialmente a vazão de ar arrastado.

As principais bases utilizadas foram o Web of Science, SCOPUS e Compendex e as palavras-chave/*strings* de busca utilizadas foram: *air entrainment AND morning glory spillway; morning glory spillway; air entrainment AND spillway; air measurement AND hydraulic structure; air measurement AND hydraulic structure; morning glory spillway AND physical model*; arraste de ar; vertedor tulipa.

RESULTADOS E CONCLUSÕES:

Tendo em vista que o enfoque inicial da pesquisa era a medição da vazão de ar arrastado, não foi possível identificar instrumentos e/ou técnicas de medição do arraste de ar nos estudos em modelo físico publicados nos últimos 10 anos. De todo modo, foi possível notar características relevantes de estudos experimentais em vertedor tipo tulipa.

A pesquisa identificou que ainda há uma escassez de estudos sobre o vertedor tipo tulipa, especialmente aqueles que utilizam modelos físicos. No período analisado, foram encontrados apenas

37 artigos em português ou traduzidos para o inglês. Observa-se que grande parte das publicações utiliza modelagem numérica, frequentemente baseada em dados experimentais para validação dos resultados. No entanto, nota-se que alguns desses estudos não apresentam uma descrição detalhada do processo experimental ou utilizam bases de dados experimentais preexistentes, sem a realização efetiva de ensaios com modelos físicos.

A variável de arraste de ar é raramente estudada, fato observado ao não encontrar experimentos que realizaram a medição desse parâmetro. De forma semelhante, Othman & Abdulrahman (2023) realizaram uma revisão sistemática com foco na utilização de modelos numéricos e físicos para estudar as características de fluxo do vertedor tipo tulipa. Os autores chegaram a conclusões importantes que concordam com as conclusões deste estudo: os modelos numéricos são a maioria dos estudos nas últimas duas décadas devido ao custo benefício e a rapidez com que se obtém resultados; poucos estudos centralizaram seus objetivos na investigação do processo de arraste de ar devido à falta de informações e medições, recomendando estudos adicionais deste parâmetro.

Em todo caso, foi possível coletar informações acerca de instrumentos e técnicas utilizados na medição de outros parâmetros do escoamento como pressão, vazão e altura do nível da água. A seguir são discutidos diferentes estudos, os parâmetros medidos em modelo físico e os instrumentos e/ou técnicas utilizados:

Othman & Abdulrahman (2024) conduziram uma série de experimentos para validar seu modelo numérico com diferentes relações entre raio e diâmetros para evidenciar impactos na direção do fluxo na variação do número de cavitação. Os autores realizaram a medição da pressão através do uso de piezômetros fixados numa placa manométrica com um tubo de polietileno de 8mm de diâmetro interior, e mediram a taxa de descarga utilizando um medidor de caudal ultrassônico calibrado.

A fim de investigar o efeito da crista multifacetada do vertedor no coeficiente de descarga, Bagheri & Nohani (2014) mediram a altura da água com um medidor de profundidade digital com precisão de 0,01 mm. A descarga foi medida pelo método volumétrico, utilizando um reservatório de 400 litros conectando a um tubo piezométrico que indicava o nível da água. Também foram instalados sensores ao longo do tubo piezométricos para registrar o tempo em que água passava de um sensor para o outro, permitindo o cálculo da vazão.

Investigando as características hidráulicas do escoamento rotacional em vertedores de eixo vertical com entradas em forma de marguerita, Kabiri-Samani & Keihanpour (2020) realizaram a medição dos seguintes parâmetros: superfície livre da água, com um conjunto de piezômetros fixados embaixo do reservatório; a altura da água sobre a crista da entrada foi medida com um medidor de calcário montado sobre a parede do reservatório principal e movendo-se de forma circular; a descarga do fluxo foi obtida através de fluxômetro eletromagnético; o perfil da superfície da água foi medido por uma câmera CCD que registra 80 imagens por segundo; e por fim, as velocidades tangenciais que foram medidas com velocímetro acústico Doppler.

Jafari & Aghamajidi (2022) mediram parâmetros como: altura da água sobre o vertedor, com um medidor metálico; e pressões com o uso de piezômetros, a fim de otimizar as dimensões geométricas e o quebra-vórtice do vertedor tipo tulipa utilizando um algoritmo genético.

Nesse sentido, foi possível notar que os parâmetros que mais apareceram nos trabalhos da área foram a vazão e o nível da água, provavelmente por permitirem o cálculo teórico de outras variáveis a partir de seus respectivos valores e por serem facilmente mensuráveis. Além disso, muitos estudos utilizam bases de dados de laboratórios de hidráulica sem apresentar nas referências os manuais de práticas desses laboratórios ou descrever o processo experimental praticado por eles, na maioria das vezes o acesso aos processos experimentais praticados é inviável, dificultando o acesso aos instrumentos e técnicas utilizados.

BIBLIOGRAFIA:

ABDUL-SAHIB, A.A., ALFATLAWI, T.J. Mitigation strategies to reduce detrimental effects of air bubbles in shaft spillways: A literature review. **Instrumentation Mesure Métrologie**, Vol. 23, n. 2, p. 141-159, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.18280/i2m.230206>. Acesso em: 15 jan. 2025.

BAGHERI, A.; NOHANI, E. Impact of making the cresto f Weir multifaceted on discharge coeficiente of morning glory spillway. **Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences**, v. 4, n. S4, p. 3633-3639, 2014. Disponível em: < http://www.cibtech.org/sp.ed/jls/2014/04/jls.htm>. Acesso em: 20 mar. 2025.

FAIS, Laura Maria Canno Ferreira. **Análise Experimental da Curva de Ligação Poço-Túnel em Vertedor com Emboque Tipo Tulipa**. 2007. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2007.408968>. Acesso em: 21 nov. 2024.

INTERNATIONAL JUNIOR RESEARCHER AND ENGINEER WORKSHOP ON HYDRAULIC STRUCTURES, 7., 2019, Denver, CO, USA. **Spillway Debris Physical Model Study Morning Glory Spillway**, 2019. 11 p. 8. Disponível em: <https://doi.org/10.26077/rz1a-bh18>. Acesso em: 12 dez. 2024.

JAFARI, J., AGHAMAJIDI, R. Optimizing geometric dimensions and vortex breaker of morning glory spillway using genetic algorithm: Case study of physical model of San Louis Forebay Dam in California, USA. **International Journal of Health Sciences**, 6(S3), 3926– 3942, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS3.6657>. Acesso em: 10 fev. 2025.

KABIRI-SAMANI, A., KEIHANPOUR, M. Hydraulic characteristics of swirling flow at shaft spillways with the marguerite-shaped inlets. **Journal of Hydraulic Research**, 59(5), 724–738, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1818313>. Acesso em: 15 fev. 2025.

OTHMAN, L.S., ABDULRAHMAN, K.Z. Advancements in Flow Behavior Investigation and Performance Enhancement of Morning Glory Spillways: A Systematic Review of Numerical and Physical Models. **Iran J Sci Technol Trans Civ Eng**, 48, 1191–1225, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01249-w>. Acesso em: 6 fev. 2025.

OTHMAN, L.S., ABDULRAHMAN, K.Z. Comprehensive Flow Analysis of Dokan Dam's Morning Glory Spillway: Utilizing Advanced Numerical and Physical Models. **Arab J Sci Eng**, 49, 13729–13747, 2024. Disponível em: < https://doi.org/10.1007/s13369-024-08781-5>. Acesso em: 18 fev. 2025.