

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA CAPACIDADE DE DESCARGA DE UM VERTEDOIRO DE BAIXA QUEDA AFOGADO POR JUSANTE

Paulo Henrique Cabral Dettmer^{1}; José Junji Ota²; André Luiz Tonso Fabiani³;
Alvaro Lima de Araujo⁴ & Hélio Costa Barros Franco⁵*

Resumo – A determinação da capacidade de descarga de vertedouros afogados por jusante através os métodos disponíveis na literatura apresenta grande grau de incerteza devido à complexidade hidráulica do escoamento, podendo gerar erros consideráveis de dimensionamento. Este trabalho avalia o uso de um modelo matemático na determinação da capacidade de descarga de um vertedouro afogado por jusante. O escoamento de um vertedouro afogado foi simulado em um modelo numérico feito com o software Ansys CFX e em um modelo físico escala 1:70. Os resultados obtidos foram confrontados verificando o potencial do modelo matemático na análise desse escoamento complexo. Os resultados mostraram que o modelo matemático pode prever a capacidade de descarga, pressões e perfil da linha de água com boa precisão, podendo ser uma ferramenta útil no projeto de vertedouros.

Palavras-Chave – Dimensionamento Hidráulico, Modelo Numérico, Vertedouro.

NUMERICAL SIMULATION OF THE DISCHARGE CAPACITY OF A SUBMERGED LOW OGEE SPILLWAY

Abstract – The determination of discharge capacity of submerged spillways by available methods in the literature lead to a great degree of uncertainty due to the hydraulic complexity, which may cause considerable design errors. This study evaluates the use of a numerical model to determine the discharge capacity of a submerged spillway. The flow of a submerged spillway was simulated in a numerical model Ansys CFX and in a 1:70 scale physical model. The results were compared in order to verify the potential of the mathematical model to analyze such complex flow. The results showed that the mathematical model can predict the discharge capacity, pressures and water surface profile with good accuracy and can be a useful tool in the design of spillways.

Keywords – Hydraulic Design, Numerical Model, Spillway.

INTRODUÇÃO

O vertedouro caracteriza-se por uma estrutura que permite a passagem segura das enchentes, protegendo a obra e garantindo a sua integridade. É muito natural que se aproveite primeiro os melhores locais para se instalar as grandes usinas hidrelétricas. Isto é, locais onde há grandes quedas com grandes vazões, em vales estreitos para que a área inundada seja a menor possível. Hoje, no entanto, há necessidade de se aproveitar locais menos favoráveis em termos de queda, mas felizmente temos grande potencial a desenvolver considerando a abundância de vazão nos rios brasileiros. Surge com isso a necessidade de se projetar vertedouros com baixas quedas, alguns com considerável submersão por jusante. A submersão por jusante pode pressurizar a crista e

¹ UFPR, LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento; paulo.cabral@lactec.org.br*

² UFPR, LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento; ota.dhs@ufpr.br

³ UFPR, LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento; andre@lactec.org.br

⁴ ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil; alvaro@eln.gov.br

⁵ ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil; hfranco@eln.gov.br

consequentemente reduzir a capacidade de descarga do vertedouro dificultando o seu dimensionamento.

O dimensionamento de vertedouros é uma etapa fundamental no desenvolvimento do projeto de uma barragem. Normalmente esse dimensionamento é feito baseando-se em experiências passadas que deram origem a ábacos obtidos através de dados experimentais de laboratório. No caso de vertedouros afogados por jusante a principal referência no assunto é o ábaco apresentado em UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (2006). No entanto, a precisão deste ábaco ainda é pouco conhecida tecnicamente, sendo a real capacidade de descarga do vertedouro comumente determinada através do estudo em modelo reduzido.

Com o desenvolvimento tecnológico dos recursos computacionais, os modelos matemáticos têm se apresentado como uma alternativa cada vez mais atraente para a simulação de diversos fenômenos físicos envolvendo fluidos. Frente às constantes observações de que o modelo reduzido apresenta custo elevado, o presente trabalho apresenta uma comparação de resultados obtidos em termos de capacidade de descarga, pressões e perfil de linha de água obtidos em um modelo físico bidimensional de um vertedouro e um modelo matemático desenvolvido com software Ansys CFX. Ambos os modelos consideraram a passagem de uma cheia para uma situação de considerável submergência por jusante formando um ressalto hidráulico afogado a jusante da crista do vertedouro. Este estudo foi desenvolvido durante um projeto de pesquisa e desenvolvimento ANEEL pela concessionária Eletronorte.

MATERIAL E MÉTODOS

Instalação Experimental – Modelo Físico

O modelo físico bidimensional do vertedouro foi construído na escala geométrica 1:70 e operado segundo o critério de semelhança de Froude. O modelo foi implantado em um canal retangular com 71,43 cm de largura (correspondente a 50 m no protótipo). A restituição do fluxo de jusante foi feita por um canal retangular com a mesma largura da soleira vertedoura. O sistema de alimentação do modelo foi constituído de dois tubos de 300 mm de diâmetro equipados com medidores do tipo Venturi, capazes de fornecer em operação conjunta vazões de até 380 l/s (15.578m³/s no protótipo). O nível de jusante foi controlado por uma comporta basculante, instalada no final do canal de restituição.

A geometria da soleira vertedoura utilizada neste estudo segue o perfil padrão sugerido em UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (2006) para uma carga de projeto de 17,00 m. O paramento de montante foi construído com inclinação de 3:3, devido à alta velocidade de aproximação que existe em vertedouros desse tipo. A adoção do paramento de montante inclinado (2:3 ou 3:3) é comum nesse tipo de vertedouro, tendo em vista as condições de estabilidade estrutural da soleira (no protótipo) e que hidraulicamente, essa inclinação diminui a formação de vórtices.

No modelo, o paramento de montante, a crista, a bacia de dissipação e os muros laterais foram construídos em acrílico cristal e o restante do modelo foi construído de cimento alisado. A Figura 1 ilustra o perfil do vertedouro utilizado e a Figura 2 ilustra o modelo físico construído no laboratório de hidráulica do LACTEC/CEHPAR em Curitiba-PR em operação.

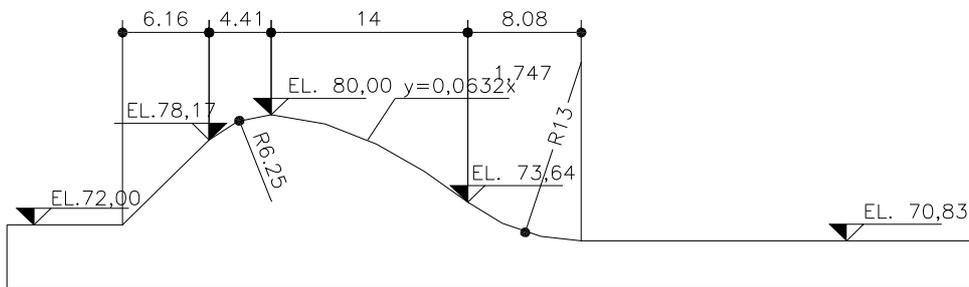


Figura 1 – Perfil do vertedouro utilizado nos estudos – Dimensões de protótipo.

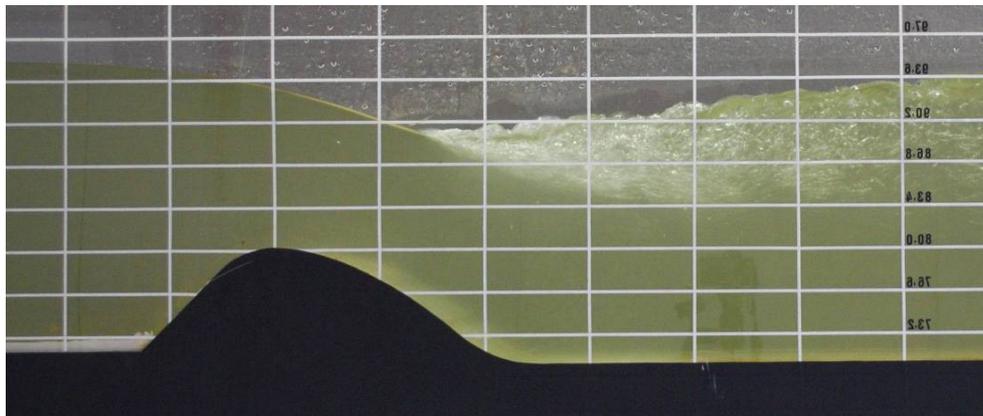


Figura 2 – Modelo reduzido em operação no laboratório de hidráulica do LACTEC/CEHPAR.

Modelos Numéricos

O estudo matemático de sistemas envolvendo escoamentos de fluidos e fenômenos relacionados é conhecido como dinâmica dos fluidos computacional. Conforme os trabalhos de Benay *et al.* (2003) e Romkes *et al.* (2003), é necessária a validação ou verificação da simulação numérica com outros métodos, como por exemplo, comparação com modelos físicos.

No início da década de 70 apareceram os primeiros artigos sobre a modelação matemática de escoamentos sobre cristas de vertedouros utilizando o método dos elementos finitos, como exemplo, Ikegawa e Washizu (1973), pesquisadores da área de estruturas, que estudaram o escoamento sobre um vertedouro de ogiva alta. Esses estudos em que não levam em conta os efeitos de jusante (calha a jusante, afogamento) são interessantes pelo lado acadêmico, mas como há uma grande quantidade de informações a respeito deste tipo de vertedouro disponível na literatura, a repercussão desses artigos não foi muito grande.

Enfocando o fluxo potencial, Ota (1986) utilizou o método dos elementos de contorno para explicar o efeito da contracurva entre o perfil Creager e a calha do vertedouro de Segredo. Esse trabalho mostrou que o escoamento na contracurva pode aumentar a pressão na crista e diminuir a capacidade de descarga. Inoue (2005) apresentou os resultados da utilização do modelo computacional CFX (v.5.7) em diferentes casos de obras hidráulicas. O objetivo principal foi verificar a eficiência de uma ferramenta que utiliza CFD em trabalhos práticos. Um desses casos foi o do escoamento sobre crista de vertedouro, onde o modelo CFX (v.5.7) se mostrou eficiente na determinação do campo de pressões e perfis de linha da água. Povh *et al.* (2013) obtiveram resultados satisfatórios comparando resultados do modelo físico bidimensional da UHE Santo Antônio com modelo numérico desenvolvido com o software FLOW-3D.

Modelo Numérico Ansys CFX

No presente trabalho foi simulado o escoamento sobre um vertedouro de baixa queda operando afogado por jusante. A solução do modelo matemático foi feita pelo software ANSYS CFX (v 11.0). O domínio computacional foi desenvolvido para se assemelhar ao modelo físico. O perfil da soleira utilizado foi o mesmo perfil apresentado na Figura 1. A malha foi composta por aproximadamente 31868 nós e 15479 elementos hexaédricos (com dimensões máximas de 1,0 m). Os elementos próximos à soleira do vertedouro foram refinados para simular a camada limite. A Figura 3 ilustra o domínio computacional do modelo CFX. A Figura 4 ilustra o refinamento da malha próximo ao contorno da soleira vertedoura.

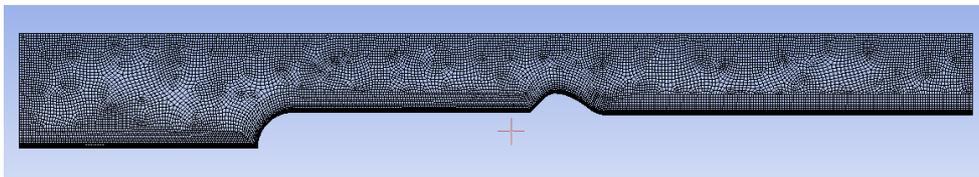


Figura 3 – Domínio computacional do modelo matemático.

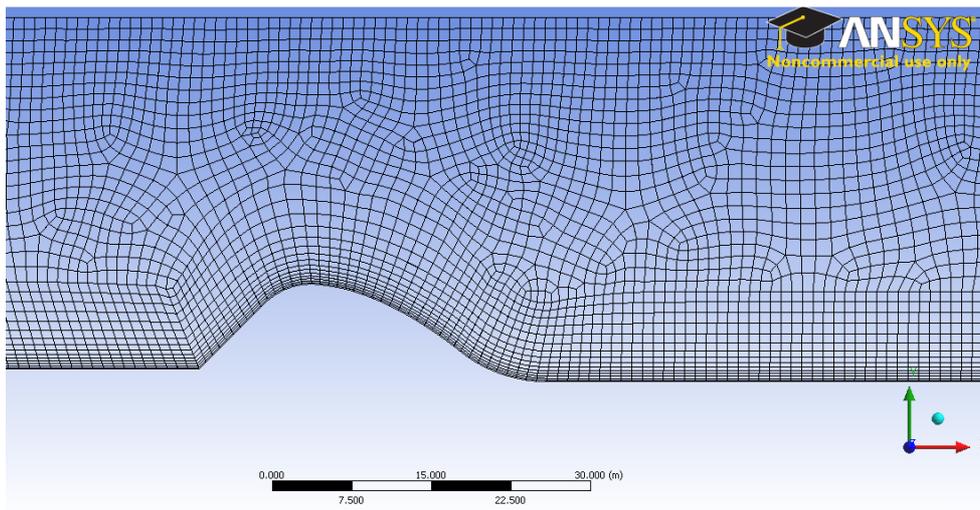


Figura 4 – Malha numérica do modelo matemático (detalhe dos elementos refinados próximo à soleira).

Devido ao caráter bidimensional do escoamento, optou-se por modelar o domínio computacional com apenas 1 m de largura, diminuindo-se assim o esforço computacional necessário para se resolver o escoamento. Para mitigar os efeitos de aproximação e de restituição do vertedouro o domínio computacional foi modelado com 400 m de comprimento (eixo longitudinal), conforme ilustrado na Figura 5.

O software Ansys CFX oferece vários modelos de turbulência, no presente trabalho foi utilizado o modelo $k-\epsilon$, que oferece uma boa relação entre esforço computacional e precisão numérica.

O problema a ser estudado envolve escoamento multifásico que engloba o escoamento de dois fluidos (água e ar), como simplificação o modelo foi configurado como homogêneo. Esta configuração assume que o ar e água compartilham o mesmo campo de velocidades, diminuindo o esforço computacional a ser realizado pelo solver.

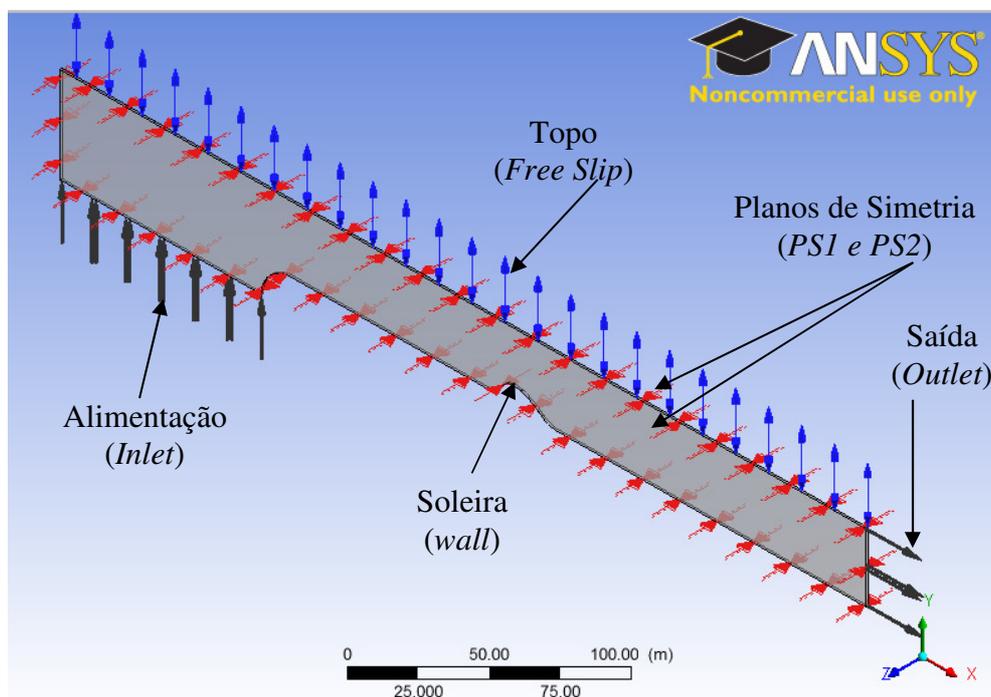


Figura 5 – Domínio do modelo computacional CFX.

Normalmente a condição de contorno fornecida envolve a distribuição de velocidades no domínio (*inlet*), porém se analisado criticamente, a distribuição de velocidades não é conhecida e precisa ser determinada através de modelos físicos. Portanto, a estrutura deste modelo matemático foi alongada a montante para que a única condição de contorno no domínio (*inlet*) fosse a vazão, forçando o modelo matemático dar a resposta fornecida pelo modelo reduzido, ou seja, a capacidade de descarga. As condições de contorno a serem fornecidas ao programa foram as mesmas impostas no modelo físico conforme descrito na sequência:

- Condição de contorno de montante: Vazão somente entrando no domínio (*inlet*), - $q = 149,40 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ e nível de água inicial (H_m); $H_m = 95,00 \text{ m}$ (considerando a cota da crista = $80,00 \text{ m}$);
- Condição de contorno de jusante: Fluxo somente saindo (*outlet*), nível de água de jusante (H_j); $H_j = 93,5 \text{ m}$ (considerando a cota da crista = $80,00 \text{ m}$ e que se conhece a curva chave do rio);
- Condição de contorno das superfícies laterais, simetria (*PS1 e PS2*);
- Condição de contorno das superfícies inferior e superior: na face superior não há resistência fluido-sólido (*wall – free slip*) e na face inferior considera-se o efeito da resistência com rugosidade similar à do concreto.

CONFRONTO DOS RESULTADOS

Após uma resolução prévia, o solver do software refina a malha automaticamente na região da interface entre a água e o ar, obtendo-se mais precisão na determinação da superfície livre da água. A malha refinada automaticamente pelo software é apresentada na Figura 6.

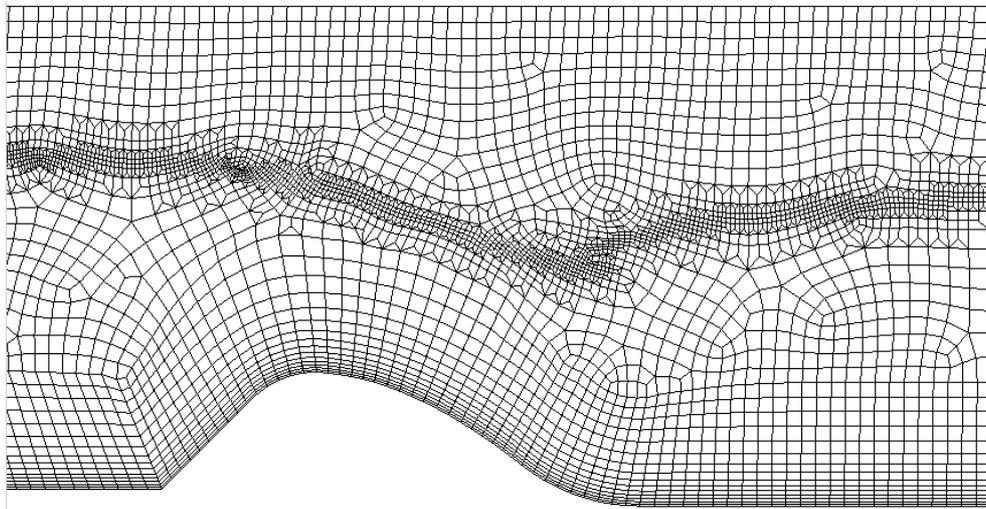


Figura 6 – Refino automático da malha nas imediações da superfície livre.

O perfil da superfície livre obtida pelo modelo matemático mostrou-se bastante razoável. Comparando-se os perfis de linha de água percebe-se uma pequena descontinuidade no ressalto hidráulico no modelo matemático (ver Figura 7). Essa descontinuidade possivelmente se deve ao fato de que no modelo matemático o ar e a água compartilham o mesmo campo de velocidades, dificultando a aeração do fluxo (entrada de bolhas de ar no modelo matemático). Talvez esta descontinuidade possa ser eliminada alterando-se as configurações do modelo matemático fazendo campos de velocidades separados para água e ar. Infelizmente essa configuração demandaria um esforço computacional maior, incompatível com o tempo disponível para a realização do projeto.

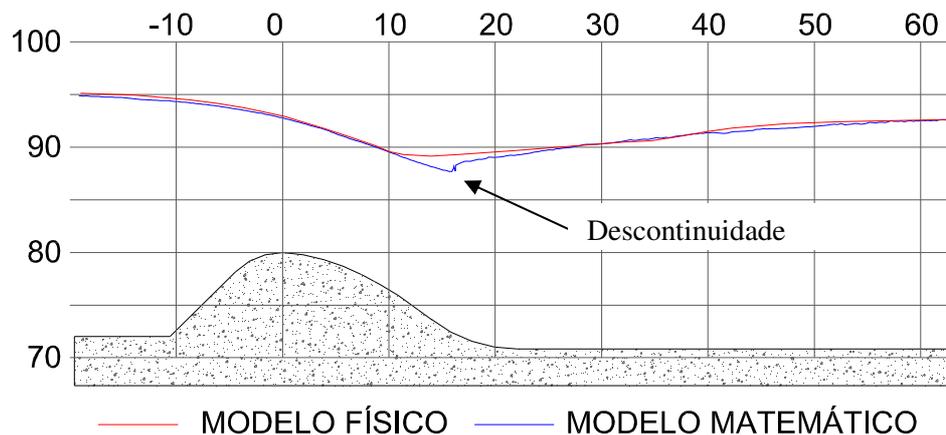


Figura 7 – Superfície livre do escoamento obtida pelo modelo físico e pelo modelo matemático.

As Figuras 8 e 9 comparam os aspectos do escoamento nos modelos físico e matemático. Pode-se concluir que o modelo CFX foi capaz de obter perfil de linha de água e simular o ressalto hidráulico de forma satisfatória.

A Figura 10 compara os resultados experimentais e numéricos relativo às pressões ao longo da soleira do vertedouro. Isto é, a figura mostra as linhas piezométricas para as duas simulações. Nota-se que as pressões ao longo da ogiva foram similares às obtidas no modelo físico, exceto pela pequena descontinuidade observada na região onde se formou o ressalto hidráulico.

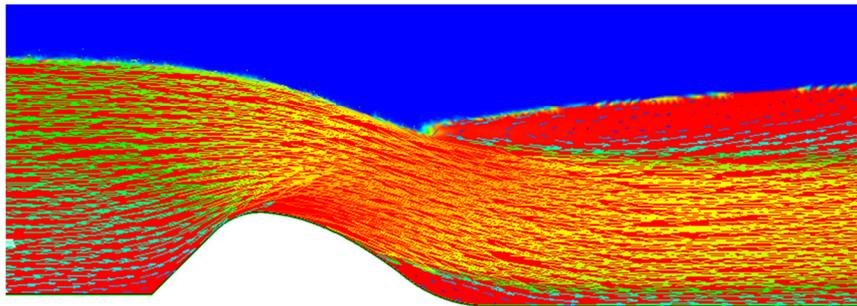


Figura 8 – Visualização do aspecto do escoamento obtido modelo matemático.

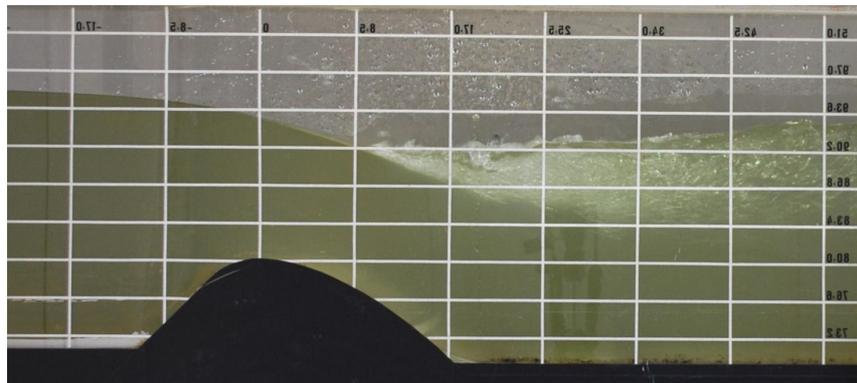


Figura 9 – Visualização do aspecto do escoamento obtido pelo modelo físico.

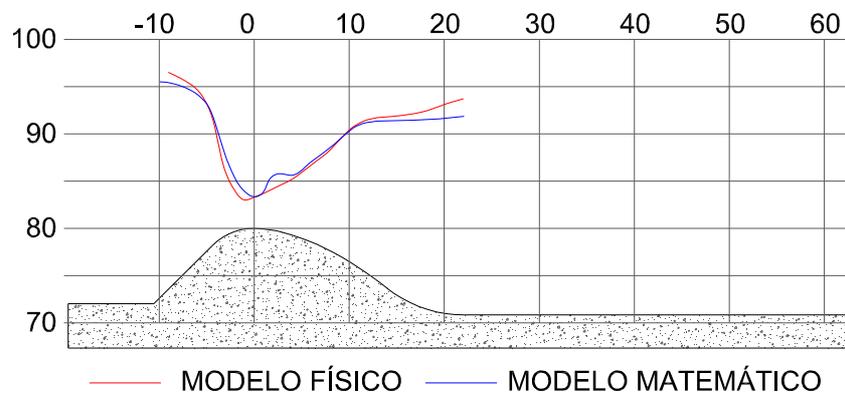


Figura 10 – Confronto das pressões obtidas nos modelos físico e matemático.

Para se avaliar a eficiência do modelo matemático na previsão do coeficiente de descarga foram comparados os níveis de água 101,5 m a montante da crista (seção utilizada para medir o nível de água no modelo). A diferença encontrada foi de 0,23 m no protótipo que leva a um erro de 2 % no valor do coeficiente de descarga. Os dados comparativos estão listados na Tabela 1, onde os valores apresentados consideram que a crista do vertedouro está na elevação 80,00 m.

Tabela 1 – Confronto dos níveis de água e capacidade de descarga dos modelos matemático e físico

Modelo	Vazão específica (m ³ /s m)	Nível a montante (m)	Velocidade de Aproximação (m/s)	Nível de Energia (m)	Coefficiente de descarga (m ^{1/2} /s)
CFX	149,40	95,20	6,44	97,31	2,07
Físico	149,40	95,47	6,36	97,54	2,03

CONCLUSÕES

Conclui-se que o modelo computacional CFX foi capaz de fornecer resultados razoavelmente satisfatórios quando comparados ao modelo físico. Os perfis de linha de água, pressões e aspecto do escoamento obtidos no modelo computacional foram semelhantes aos obtidos no modelo físico, exceto por uma pequena descontinuidade no ressalto hidráulico, que ocasionou mudanças no perfil de linha de água e pressões. Essa descontinuidade foi aparentemente ocasionada por uma simplificação dos parâmetros no modelo matemático, que admitiu que água e o ar compartilhavam o mesmo campo de velocidades no modelo computacional.

O nível de energia resultante a montante do vertedouro apresentou uma diferença de 0,23 cm, que é considerável no caso do projeto de usinas de médio e grande porte, fazendo com que o modelo físico ainda seja referência para determinação da capacidade de descarga de grandes obras hidráulicas. No entanto, pode-se concluir que o modelo computacional é uma ferramenta muito útil na fase de pré-dimensionamento de um vertedouro, mesmo que afogado por jusante, mas há muito para se desenvolver para garantir o nível de confiabilidade que tem os modelos físicos.

REFERÊNCIAS

- BENAY, R.; CHANETZ, B.; DÉLERY, J. (2003). Code verification/validation with respect to experimental data banks. *Aerospace Science and Technology*, v.7, n.4, pp.239 – 262.
- DETTMER, P. H. C.; OTA, J.; FABIANI, A. L. T. *Estudo da capacidade de descarga de vertedouros de baixa queda com elevado grau de submersão*. LACTEC / CEHPAR. Curitiba, p. 52. 2004. (Projeto HL-163 rel. 4).
- IKEGAWA, M.; WASHIZU, K. (1973) Finite element method applied to analysis of flow over a spillway crest. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v.6, n.2, p.179-189.
- INOUE, F.K. (2005). *Modelagem matemática em obras hidráulicas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. 99p.
- OTA, J.J. (1986) Considerações sobre capacidade de descarga e pressões na região da crista de vertedouros de encosta. In *Anais do Congresso Latino-americano de Hidráulica*, Dezembro 1986, São Paulo. v.4, p.142 – 148.
- POVH, P.H.; ARAUJO, M.F.; VANZ, A.L. (2013) Simulação numérica do Vertedouro da UHE Santo Antônio In *Anais do XXIX Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Abril 2013, Porto de Galinhas. T 107 – A21.
- ROMKES, S.J.P. et al. (2003). CFD modeling and experimental validation of particle-to-fluid mass and heat transfer in a packed bed at very low channel to particle diameter ratio. *Chemical Engineering Journal*, v.96, p.3 – 13.
- UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (2006). Spillways. In: *Design of small dams*. New Delhi, SBS Publishers & Distributors, pp.339 – 434.