

ANÁLISE COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO EM ESTRUTURAS DE VERTEDOUROS EM DEGRAUS

Lobosco R.J.^a e Schulz H.E.^{a,b}

^a*Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, rlobosco@usp.br*

^b*Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, heschulz@sc.usp.br*

Palavras Chave: Fases dispersas, enlaçamento de ar, transporte turbulento, interação gás-líquido.

Resumo. Os vertedouros em degraus possuem extensivas aplicações na engenharia hidráulica e ambiental. São utilizados com a finalidade principal de dissipar energia e acarretam uma redução significativa do tamanho e do custo das bacias de dissipação. Este trabalho desenvolve a simulação numérica do escoamento sobre vertedouros em degraus através do uso de software livres e compara os resultados computacionais com dados da literatura. O escoamento multifásico ar-água foi investigado de forma que o risco de cavitação fosse previsto numericamente através da análise da pressão nos degraus. A entrada de ar possui relevância fundamental na dissipação de energia pois aumenta a compressibilidade da mistura, reduz o risco de cavitação e, conseqüentemente, evita que danos sejam causados à estrutura. Pelo fato do escoamento ser turbulento adotou-se o modelo $k-\varepsilon$. O tratamento da superfície livre foi realizado através do método VOF (Volume of Fluid). Como ferramenta de Fluido dinâmica Computacional (CFD) foi utilizado o software livre *OpenFoam* (Open Source Field Operation and Manipulation). Devido à dificuldade de geração de malha no perfil de ogiva recomendado pela WES (Waterways Experiment Station, do Corps of Engineers) para a estrutura hidráulica, adotou-se aqui o software livre *Salome* para a geração da malha, que permitiu superar esta dificuldade.

1 INTRODUÇÃO

Os vertedouros são estruturas hidráulicas utilizadas em barragens de retenção de água para liberar os exedentes e evitar inundações. O escoamento sobre o vertedouro ocorre quando o fluido do reservatório excede a capacidade de armazenamento deste. Esse excedente pode causar impactos no canal a jusante, geralmente vinculados à velocidade do escoamento, sendo para tanto projetadas bacias de dissipação. O dimensionamento das bacias de dissipação depende diretamente da capacidade prévia do vertedouro dissipar energia. Estudos recentes [Boes \(2003\)](#) mostram que as bacias de dissipação podem ter seu tamanho reduzido significativamente quando as estruturas hidráulicas apresentam alta eficiência de dissipação, o que reduz significativamente o custo da construção. Os contínuos avanços computacionais e numéricos permitem avaliar o escoamento sobre estruturas e otimizar as condições operacionais do projeto tanto no aspecto estrutural quanto no aspecto fluido dinâmico. Pode-se ressaltar que a utilização dessas ferramentas vem crescendo continuamente em aplicações da engenharia de recursos hídricos.

O principal objetivo dos degraus é dissipar energia. O escoamento multifásico ar-água, torna-se inerentemente turbulento pela presença dos degraus, como pode ser visto na Figura (1). Para o tratamento da turbulência foi adotada a abordagem de média de Reynolds com o modelo de fechamento $k - \varepsilon$. As simulações foram realizadas com o uso dos softwares livres *OpenFoam* e *Salome*, destinados a análises de fluido dinâmica computacional (CFD) e estrutural, respectivamente. O software *Salome* foi utilizado para geração da malha e, conseqüentemente, para a representação do domínio do vertedouro. Foi adotada, uma malha hexaédrica, capaz de fornecer uma boa representação do perfil de ogiva. A cavitação (formação e colapso de bolhas de vapor) é um dos problemas capazes de causar danos a estrutura dos vertedouros. A severidade dos danos estará diretamente relacionada à intensidade do fenômeno de cavitação e ao tempo de atuação. A redução do risco de cavitação e a re-oxigenação da água são aspectos que dependem da aeração do escoamento e possuem relevância no aspectos ambiental e de estabilidade da estrutura. A presença do ar aumenta a transferência de gases atmosféricos dissolvidos para a água, bem como aumenta a compressibilidade da mistura ar-água, amortizando o colapso de bolhas próximo à estrutura. Segundo [Peterka \(1953\)](#), é necessário 5 a 10% de ar para proteger o concreto. A posição de início da aeração também tem sido alvo de estudo nas últimas décadas, [Tozzi \(1992\)](#) e [Povh \(2000\)](#). Estudos experimentais e teóricos acerca de aeração de vertedouros podem ser encontrados em [Arantes et al. \(2010\)](#) e [Lima et al. \(2010\)](#).

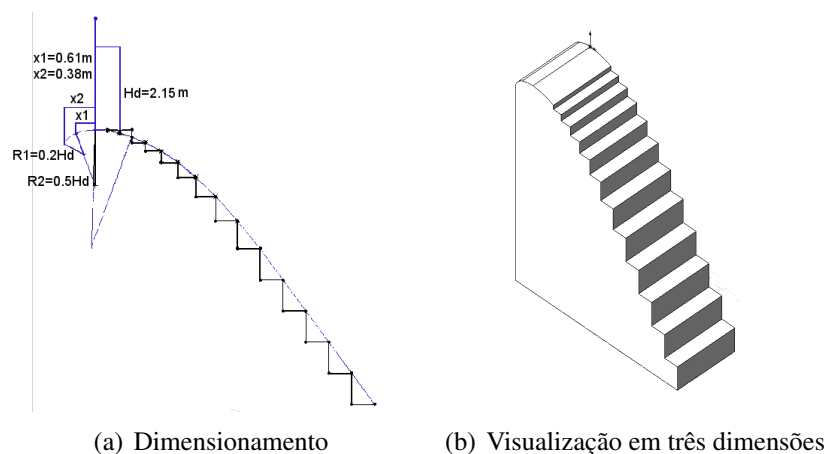
2 DESCRIÇÃO DO MODELO

As características do escoamento em vertedouros em degraus foram investigadas utilizando o modelo CEDEX proposto por [Garcia e Mateos \(1995\)](#), conforme a Figura (2). O modelo é caracterizado por possuir os primeiros degraus em tamanhos menores. A declividade da calha é 0,75 : 1 ($h : v$). A coluna de água possui a dimensão: $H_d = 2,15m$. No vertedouro existem ao todo 12 degraus, numerados de 1 a 12, de cima para baixo. A tensão superficial entre o ar e a água é dada por: $\eta = 0,07N/m$. As simulações começaram no tempo $t = 0$ com uma coluna de fluido inicialmente estacionária de altura H_d . A condição de contorno na saída foi definida como gradiente nulo. As paredes foram tratadas com um valor fixo de velocidade nula. As propriedades da água foram consideradas a 298K.

O escoamento de entrada e a forma da crista são parâmetros controlados no desempenho do vertedouro. Para escoamentos gerados por colunas de água com dimensões verticais menores que H_d a crista age como um elemento de resistência e reduz a descarga de água, entretanto para colunas de água maiores que H_d a descarga pode ser incrementada devido às pressões



Figura 1: Foto gentilmente cedida, projeto da empresa Engevix.



(a) Dimensionamento

(b) Visualização em três dimensões

Figura 2: Perfil CEDEX proposto por Garcia e Mateos (1995)

negativas que podem ocorrer. Segundo Chatila (2004), a pressão negativa é favorável neste aspecto, porém não deve ser excessiva para evitar cavitação.

3 ANÁLISE NUMÉRICA

Simulações que possuem superfície livre agregam um grau de dificuldade maior para caracterização do escoamento porque a localização da superfície não é previamente conhecida. Essa região exige uma malha suficientemente refinada e um alto número de iterações. O método de volume de fluido (VOF) foi utilizado assumindo-se dois fluidos imiscíveis, ar e água. Um indicador escalar alpha é usado para definir o volume do fluido 1, denotado por V_1 , em cada elemento. Dessa forma, V_2 (o volume do segundo fluido) é simplesmente $1 - \alpha$. Como alpha é também a fração de volume da célula ocupada por um determinado fluido temos que $\alpha = V_1/V$. O valor unitário corresponde a célula cheia de um determinado fluido enquanto o valor nulo indica que a célula não contém esse fluido. Células com valores entre zero e um representam a interface. O acompanhamento da interface ar-água é dado pela solução da equação

da continuidade, Equação (1).

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

A equação de Navier-Stokes para fluidos viscosos incompressíveis está representado na Equação (2).

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \cdot \nabla^2 \vec{u} + \vec{g} \quad (2)$$

Esta equação envolve o produto de componentes da velocidade em diferentes direções. Para, simplificar os cálculos, o vetor velocidade é dividido em uma componente média e em uma componente variável no tempo (denominada de flutuação de velocidade). Dessa forma são escritas as Equações Reynolds para o regime incompressível, que se compõem da equação da continuidade e da quantidade de movimento para as componentes das velocidades médias e suas flutuações, conforme mostram as Equações (3).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) &= 0, \\ \frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \times \bar{u}) &= \nabla \cdot (\tau - \overline{\rho u' \times u'}) + S_M. \end{aligned} \quad (3)$$

O tensor de tensões molecular é representado por $\tau = \mu \cdot \nabla \cdot \bar{u}$ e S_M é o termo fonte da equação de quantidade de movimento. Os produtos de flutuações de velocidade necessitam de modelos "ad hoc" que permitam quantificá-los. O modelo de fechamento $k - \epsilon$ é aqui usado, cujas constantes, estão listadas na Tabela 1.

C_μ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	σ_k	σ_ϵ
0,09	1,44	1,92	1,0	1,3

Tabela 1: Constantes empíricas do modelo $k - \epsilon$.

Foi utilizado o algoritmo PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operator) como método de acoplamento pressão-velocidade. O algoritmo pode ser utilizado no software *OpenFoam* para problemas transientes e está baseado em procedimentos iterativos, capazes de avaliar a solução num dado instante de tempo e corrigi-la. Na análise dos escoamentos, o campo de pressão evidencia características locais relevantes. No caso de escoamento em vertedouros escalonados o diagrama de pressão se modifica de acordo com a fração de vazios. As simulações demonstram as prováveis regiões de ocorrência de cavitação de acordo com as regiões de baixa pressão. Os resultados foram comparados com dados da literatura. A malha estruturada desenvolvida no software *Salome* está ilustrada na Figura (3).

3.1 Representação física

O problema proposto analisa as condições de pressão para o escoamento transiente tridimensional, de uma coluna de água que é liberada para escoar sobre o perfil escalonado do vertedouro até a condição de repouso. Os resultados obtidos foram comparados com a distribuição de pressões investigadas em condições operacionais de regime permanente, conforme apresentados em [Chen et al. \(2002\)](#) e [Gomes \(2006\)](#). A Figura (4(b)) representa o perfil do escoamento em um dado instante de tempo, enquanto a Figura (4(a)) representa fisicamente os instantes anteriores à liberação da coluna de água (que pode ser associado à abertura da comporta sobre o vertedor).

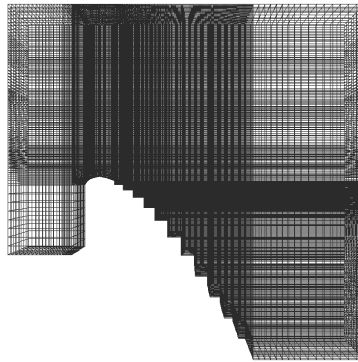


Figura 3: Malha representativa do domínio computacional.

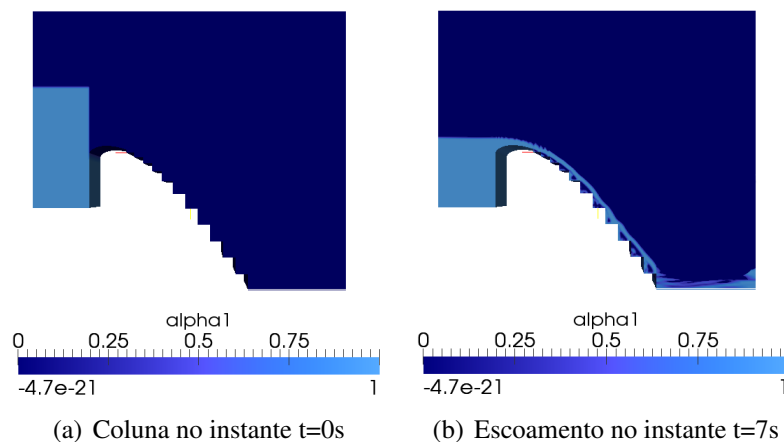


Figura 4: Perfil do escoamento

4 RESULTADOS

4.1 O perfil de distribuição de pressão

Segundo [Chanson \(1994\)](#) existem quatro maneiras de evitar os danos a estrutura causados pela cavitação: Reduzindo o número crítico da cavitação (por exemplo reduzindo as irregularidades da superfície); Aumentando a resistência do material; Diminuindo o colapso de bolhas nas fronteiras sólidas; Induzindo a aeração do escoamento. A cavitação inicia quando o escoamento gera pressões da ordem de grandeza da pressão de vapor do líquido. Os núcleos cavitacionais chegam à fronteira sólida através de grandes estruturas turbilhonares que migram para o interior da camada limite, [Arndt \(2002\)](#). O desenvolvimento da camada-limite é importante no controle da cavitação, porque seu afloramento coincide com a origem da aeração do escoamento. Também é interessante mencionar que os esforços mais críticos são registrados próximo a região de afloramento da camada limite, [Matos et al. \(1999\)](#) e [Gomes et al. \(2005\)](#).

Os resultados obtidos na presente simulação computacional assemelham-se qualitativamente aos descritos por [Frizell \(1991\)](#). Os autores mencionam que o trecho mais sujeito à cavitação é a parte superior do paramento vertical do degrau. Conforme a [Figura \(5\)](#) esta é justamente a região que apresenta as pressões aqui obtidas com os valores mais baixos.

Baseado em uma análise estatística de previsão de pressões, [Amador \(2005\)](#) sugere vazões específicas para evitar a ocorrência de cavitação. O autor estipula que a velocidade máxima na região de desenvolvimento da camada limite não deve ultrapassar 15m/s (O estudo foi desen-

volvido em degraus de 0,6 e 1,2m). As distribuições de pressão obtidas numericamente foram comparadas com as descritas por [Chen et al. \(2002\)](#). É possível perceber que a região de impacto do jato sofre influência do escoamento a montante que, por sua vez, irá influenciar na região de colisão a jusante. No caso transiente, essas regiões de impacto variam ao longo do tempo. Esse pode ser o motivo da diferença nos valores obtidos através da presente simulação quando comparados aos dados de [Chen et al. \(2002\)](#), Figura (6), que realizaram sua simulação em regime permanente. Entretanto existe consistência nos resultados com relação as regiões críticas para ocorrência de cavitação. Embora os modelos tenham sido calibrados com as especificações do modelo CEDEX, existe uma diferença na altura da representação da superfície da água. Diferenças como esta certamente serão minimizadas em se considerando regime permanente.

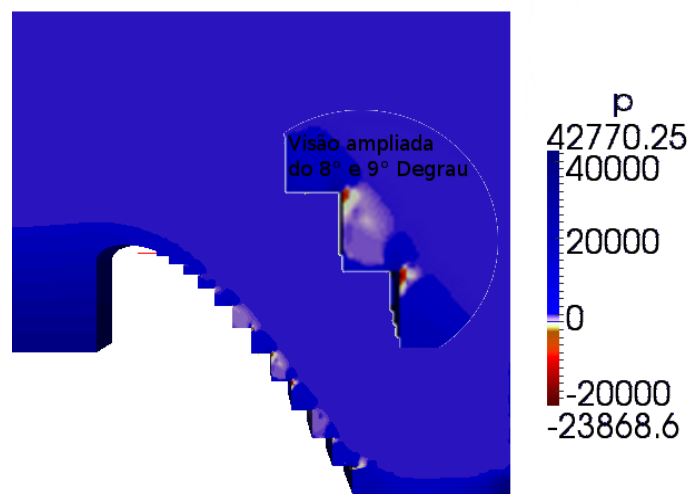


Figura 5: Perfil de distribuição de pressão.

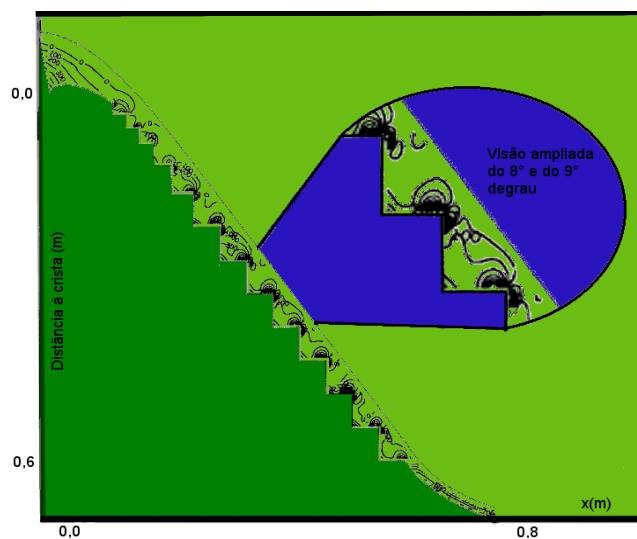


Figura 6: Perfil de distribuição de pressão [Chen et al. \(2002\)](#).

5 CONCLUSÕES

O estudo de escoamentos em vertedouros escalonados envolve características bi-fásicas e hidrodinâmicas complexas, sendo necessário lançar mão de ferramentas computacionais. O presente estudo permitiu "observar" um escoamento transiente e gerar dados relacionados com a evolução da pressão junto aos degraus do vertedouro. Uma das grandes vantagens desse tipo de simulação numérica é a capacidade de ilustrar as características do escoamento em qualquer posição, em todos os instantes de tempo. No presente estudo adotou-se um instante de tempo arbitrário para comparação com os dados da distribuição de pressão em regime permanente. Novas análises ainda precisam ser realizadas, entretanto é possível constatar que as regiões críticas ao risco de cavitação estão coerentes com os resultados da literatura. Como decorrência, esta ferramenta de simulação numérica tem condições de ser implementada para o estudo do enlaçamento de ar como prevenção da cavitação. Destaca-se ainda que o uso de ferramentas de fluido dinâmica computacional gratuitas tem contribuído para o acesso às ferramentas de simulação com o intuito de auxiliar no projeto de estruturas que interagem com os líquidos de maneira complexa.

REFERÊNCIAS

- Amador A. *Comportamiento Hidráulico de los Aliaderos escalonados en presas de hormigón compactado*. Tese de Mestrado, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2005.
- Arantes E., Porto R., Gulliver J., Lima A., e Schulz H.E. Lower nappe aeration in smooth channel: experimental data and numerical simulation. *AABC Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 82:521–537, 2010.
- Arndt R. Cavitation in fluid vortical flows. *Annual Rev. of Fluid Mechanics*, 534:143–175, 2002.
- Boes R.M. e Hager W. Hydraulic design of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9):671–679, 2003.
- Chanson H. Aeration and de-aeration at bottom aeration devices on spillways. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21(3):404–409, 1994.
- Chatila J. e Tabbara M. Computational modeling of flow over an ogee spillway. *Computers & Structures*, 82:1805–1812, 2004.
- Chen X., Dai G., e Liu H. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped overflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7):683–688, 2002.
- Frizell K. H. M.B.W. Designing spillways to prevent cavitation damage. *Concrete International*, 13:58–64, 1991.
- García E. e Mateos I. Aliviaderos escalonados. Diseño de la transición entre el umbral y la rápida escalonada. *Ingeniería Civil*, 99:3323–3341, 1995.
- Gomes J., Sanagiotto D., Dai Prá M., Wiest R.A., Bastos J., Endres L., e Marques M. Influência da declividade e da aeração sobre o campo de pressões em vertedouros em degraus. In *XVI Simpósio Brasileiro de Recursos hídricos, João Pessoa, Brasil. 2005*.
- Gomes J.F. *Campo de Pressões: Condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade IV:0,75H*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- Lima A., Schulz H.E., e Gulliver J. Air uptake along the lower nappe of a spillway aerator. *Journal of Hydraulic Research*, 46:839–843, 2010.
- Matos J., Sanchez-Juny M., Quintela A., e Dolz J. Characteristic depth and pressure profiles over stepped spillways. In *In proceedings of XXVIII IAHR Congress, Graz, Austria. 1999*.
- Peterka A. The effect of entrained air on cavitation pitting. In *5th IAHR Congress, Minneapolis*,

507-518. 1953.

Povh P. *Avaliação da energia residual a jusante de vertedouros em degraus com fluxos em regime skimming flow*. Tese de Doutorado, Departamento de tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2000.

Tozzi M. *Caracterização/comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 1992.