

# EFEITOS DE ESCALA EM ESCOAMENTOS SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS: INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA E COMPUTACIONAL

Lucas C. da S. Tassinari<sup>1</sup>, Daniela G. Sanagiotto<sup>1</sup>, Luísa L. Lauffer<sup>1</sup>,  
Marcelo G. Marques<sup>1</sup> e Edgar F. Trierweiler Neto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS, Brasil.

<sup>2</sup>Eletrobras Furnas, Brasil.

E-mail: lucascstassinari@gmail.com, dsanagiotto@ufrgs.br, luisalauffer@gmail.com, mmarques@iph.ufrgs.br, edtrier@furnas.com.br

## Introdução

Os vertedouros são de grande importância às barragens, garantindo a sua segurança contra os excessos de água das enchentes. Quando estes são construídos em degraus, parte da energia do escoamento é dissipada ao longo da própria calha do vertedouro, permitindo reduzir as dimensões das estruturas de dissipação de energia a jusante do barramento (Sanagiotto, 2003), gerando significativa economia financeira às obras.

A partir de estudos experimentais, desenvolvidos ao longo dos anos, foi possível caracterizar o escoamento sobre diferentes configurações de vertedouros em degraus a partir da análise de pressões, velocidades, lâminas d'água e frações de ar. Para estes estudos experimentais, devido à característica turbulenta do escoamento e à importância das forças gravitacionais e de inércia, utiliza-se a lei de semelhança de Froude, a qual exige similaridade geométrica e igualdade no número de Froude. No entanto, ao utilizar o fluido água para os modelos físicos reduzidos, não são transpostos os efeitos de viscosidade, de tensão superficial e de concentração de ar observados no protótipo, acarretando erros na modelagem (Sanagiotto, 2003), que são efeitos de escala.

Semelhança pode ser definida como o estudo da previsão das condições do protótipo a partir de observações efetuadas em modelos (Potter; Wiggert, 2004). Entretanto, para que ocorra semelhança total, é necessário que se tenha semelhança geométrica, cinemática e dinâmica. Ou seja, a exata semelhança entre modelo e protótipo requer que todas as relações de força sejam idênticas, onde todos os parâmetros estão em escala. Isso obriga que se tenha igualdade entre protótipo e modelo em todos os adimensionais, como Froude, Reynolds, Weber, Euler, Mach, Strouhal, entre outros.

Uma incerteza que se tem na modelagem experimental de modelos reduzidos é o efeito de escala. Assim, com o objetivo de minimizar tais efeitos em modelos que adotem a semelhança de Froude, deve-se escolher uma escala geométrica mínima que garanta escoamento no modelo dentro do regime turbulento rugoso, tal como se observa em protótipos. Para estudos de escoamentos aerados, como é o caso de vertedouros em degraus, é usual em estudos em modelos reduzidos que se adotem escalas maiores que 1:15, sendo usual o uso da escala geométrica 1:10 (Terrier, 2016).

Ao longo dos anos, modelos matemáticos têm sido propostos e aperfeiçoados para escoamentos turbulentos. A partir disso, pode-se dizer que a modelagem numérica computacional surge como uma importante ferramenta de análise detalhada de escoamentos, a qual proporciona flexibilidade para estudar estruturas hidráulicas com diferentes configurações e, no presente trabalho, fluidos com diferentes características.

Este artigo busca investigar, portanto, o efeito de escala no escoamento turbulento sobre vertedouros em degraus a partir a aplicação simultânea de semelhança de Froude, Reynolds, Euler e Weber, utilizando-se uma abordagem computacional.

## Metodologia

Neste trabalho será verificado, através de simulação numérica,

qual seriam os efeitos de escala nas pressões próximas às quinas dos degraus (patamar e espelho). Para atender a esse propósito, considerou-se um protótipo com as seguintes características: vertedouro em degraus, com calha com declividade 1V:0,75H, degraus com altura igual a 60 cm e vazão igual a 10 m<sup>3</sup>/(s.m).

Foram realizadas simulações de escoamentos utilizando o software Ansys CFX. Selecionaram-se 3 escalas diferentes da geometria do vertedouro em degraus estudado por Sanagiotto (2003): protótipo (1:1), escala 1:10 e escala 1:100.

A simulação na escala de protótipo é a referência para a análise dos resultados, pois os resultados das simulações foram transpostos para esta escala. A escala 1:10 foi escolhida para o presente estudo por ser recomendada em modelos que envolvem fenômenos de entrada de ar, conforme apresentado por Chanson *et al.* (2002) e Terrier (2016). A escala 1:100 é a escala limite adotada, considerando que para as características de protótipo do presente estudo, esta escala resulta em uma estrutura com dimensões tão pequenas que dificilmente se poderia utilizar para um estudo experimental.

Em modelos experimentais em escala não é possível obter semelhança total para o escoamento sobre um vertedouro, pois o fluido é o mesmo (água) no modelo e no protótipo. Entretanto, computacionalmente, é possível alterar as características do fluido de forma a se ter semelhança em outros adimensionais a partir da consideração de um fluido hipotético, levando em conta, além dos efeitos gravitacionais, os efeitos de viscosidade e da tensão superficial.

A partir do número de Froude, considerando-se uma escala geométrica ( $\lambda$ ) e que a aceleração da gravidade é a mesma tanto para o modelo quanto para o protótipo, temos que a escala de velocidades é  $\lambda_v = \sqrt{\lambda}$ .

De forma a proporcionar semelhança nos efeitos das forças viscosas, definiu-se a escala de viscosidade cinemática ( $\lambda_\nu$ ), a partir da igualdade do número de Reynolds do protótipo com o modelo, como sendo  $\lambda_\nu = \lambda^{3/2}$ .

Utilizando-se o número de Euler, chegou-se a uma escala de variação de pressão ( $\lambda_{\Delta p}$ ) em função da escala geométrica e da escala de massa específica ( $\lambda_\rho$ ) da seguinte forma:  $\lambda_{\Delta p} = \lambda_\rho \cdot \lambda$ .

A partir o número de Weber, chegou-se a uma escala de tensão superficial ( $\lambda_\sigma$ ) em função da escala geométrica e da escala de massa específica, da seguinte forma:  $\lambda_\sigma = \lambda_\rho \cdot \lambda^2$ .

Portanto, nesta análise, sem que fosse especificada uma escala de massa específica, não seria possível definir as escalas de pressão e tensão superficial. Assim, considerou-se que a massa específica do fluido hipotético é igual à da água ( $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ ). Dessa forma, têm-se as seguintes escalas:  $\lambda_{\Delta p} = \lambda$  e  $\lambda_\sigma = \lambda^2$ .

Neste contexto, foram realizadas simulações com CFD utilizando-se água escoando sobre uma geometria de vertedouro com três escalas diferentes, respeitando a lei de semelhança de Froude, e fluidos hipotéticos (tabela 1) para duas escalas geométricas (1:10 e 1:100), com semelhanças em outros três adimensionais. Isso resultou em cinco condições simuladas: (i) escoamento de água sobre protótipo (escala 1:1); (ii) escoamento de água sobre modelo reduzido em escala 1:10; (iii) escoamento de água sobre modelo reduzido em escala

1:100; (iv) escoamento de um fluido hipotético sobre modelo reduzido, com escala 1:10, e; (v) escoamento de um fluido hipotético sobre modelo reduzido, com escala 1:100.

Tabela 1.- Características da água e dos fluidos hipotéticos.

Escala/ Condições simuladas	Massa específica ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosidade Cinemática ( $\nu$ ) [m <sup>2</sup> /s]	Viscosidade Absoluta ( $\mu$ ) [kg/(m.s)]	Tensão Superficial Fluido-Ar ( $\sigma$ ) [N/m]
1:1 (água) i/ii/iii	997,0	8,9x10 <sup>-7</sup>	8,9x10 <sup>-4</sup>	0,07230
1:10 iv	997,0	2,8x10 <sup>-8</sup>	2,8x10 <sup>-5</sup>	0,00072
1:100 v	997,0	8,9x10 <sup>-10</sup>	8,9x10 <sup>-7</sup>	7,2x10 <sup>-6</sup>

A comparação entre os resultados foi feita analisando-se as cargas de pressões nos patamares e espelhos de alguns degraus, já transpostos para a escala do protótipo.

## Resultados e discussões

As figuras 1 e 2 apresentam as pressões obtidas nas simulações para o espelho e para o patamar do degrau 24, para a vazão específica igual a 10 m<sup>3</sup>/(s.m), referente ao protótipo. A aeração para estas condições ocorreria nas proximidades do degrau 22 (Sanagiotto, 2003). O degrau 24, portanto, está situado na região mais crítica do escoamento, conforme Gomes (2006).

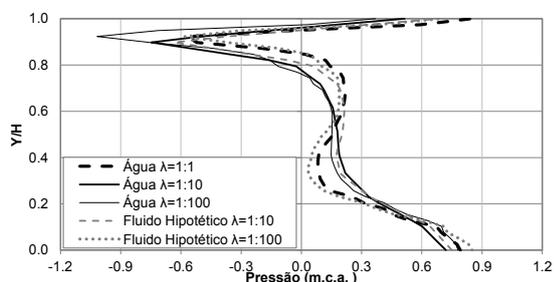


Figura 1.- Resultados, em escala de protótipo, das cargas de pressão no espelho do degrau 24.

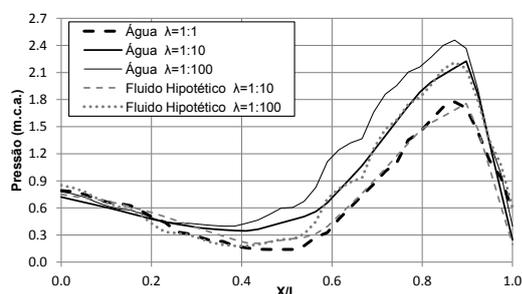


Figura 2.- Resultados, em escala de protótipo, das cargas de pressão no patamar do degrau 24.

Analisando-se apenas os resultados obtidos para as simulações com água, observa-se que quanto menor é a escala considerada, maior é a magnitude da pressão negativa que ocorre na parte superior do espelho ( $Y/H \cong 0,9$ ) e maior é a pressão positiva que ocorre próximo à quina do patamar ( $X/L \cong 0,85$ ). Isso mostra o efeito que a mudança de escala proporciona, sendo que quanto menor for a escala, mais rapidamente os resultados se afastam dos reais (tendo-se como referência os resultados da simulação em escala de protótipo  $\lambda = 1:1$ ).

No entanto, ao observar os resultados das simulações com os fluidos hipotéticos, onde as suas características de tensão superficial fluido-ar e viscosidade absoluta foram alteradas de forma a se ter também semelhança frente aos números de Euler,

Weber e Reynolds, as diferenças entre as pressões reduziram.

Comparando-se os resultados entre as simulações com água com escalas 1:100 e 1:1, nas figuras, chegou-se a diferenças entre pressões médias extremas de 0,45 m.c.a. e 0,68 m.c.a., para o espelho e para o patamar do degrau 24, respectivamente. Contudo, ao analisar as diferenças entre a simulação com água para a escala 1:1 e a simulação com o fluido hipotético para a escala 1:100, verificou-se que as diferenças reduziram consideravelmente, para valores da ordem de 0,01 m.c.a. e 0,44 m.c.a., para o espelho e para o patamar, respectivamente.

Isso confirma a hipótese de que, mesmo em um escoamento turbulento e aerado, que é o caso do escoamento sobre vertedouros em degraus, há efeitos de escala em modelos de Froude. Com isso, a relaxação dos números de Reynolds, Euler e Weber, comum à modelagem experimental de vertedouros, implica erros. Neste estudo, estes erros chegaram a valores de até 1,3 m.c.a., quando comparadas em escala de protótipo, as pressões obtidas nas condições i e iii, para vazão de 10 m<sup>3</sup>/(s.m).

## Conclusões

Esse estudo mostrou que os efeitos de escala que surgem em modelos experimentais podem resultar diferenças de pressões consideráveis, tendo sido observadas diferenças de até 1,3 m.c.a. entre modelo e protótipo (observado no patamar do degrau 18), quando comparados os resultados transpostos para escala real. Contudo, a utilização de modelos reduzidos para estimar pressões em estruturas hidráulicas, neste caso, induziu a situações mais críticas do que às observadas no protótipo, onde há maior aeração do escoamento, resultando maior segurança em termos de pressões médias. Esta conclusão vai ao encontro das conclusões de Teixeira (2008).

Este trabalho também indica que a modelagem computacional é uma boa ferramenta ao estudo do efeito de escala, podendo-se alterar as características do fluido e, assim, garantir a semelhança dinâmica entre modelo e protótipo.

Em um trabalho futuro, estes resultados serão analisados em conjunto com dados experimentais provenientes de modelos reduzidos, executados dentro do Projeto de P&D citado nos agradecimentos deste trabalho, além de serem realizadas análises para outras vazões.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro do Projeto de P&D intitulado “Análise da Macroturbulência em Vertedouros em Degraus com Aeração Forçada (Pré-Aeração)” firmado entre LAHE/DEC/FURNAS e FAURGS/IPH/UFRGS.

## Referências bibliográficas

- Chanson, H., Yasuda, Y and Ohtsu, I (2002). “Flow resistance in skimming flows in stepped spillways and its modelling”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 29, No. 7, pp. 809-819.
- Gomes, J. F. (2006). *Campo de pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade  $1V:0,75H$* , Tese. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre.
- Potter, M. C. and Wiggert, D. C. (2004). *Mecânica dos Fluidos*. São Paulo: Cengage Learning.
- Sanagiotto, D. G. (2003). *Características do escoamento sobre vertedouros em degraus com declividade  $1V:0,75H$* , Dissertação. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre.
- Teixeira, E. D. (2008). *Efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico*, Tese. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre.
- Terrier, S. (2016). *Hydraulic performance of stepped aerators and related downstream flow features*, Communication 63. Laboratory of Hydraulic Constructions, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.