

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

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

*Lucas Camargo da Silva Tassinari (1), Daniela GuzzonSanagiotto (1), Luísa LudtkeLauffer (1),  
Marcelo Giulian Marques (1), Edgar Fernando Trierweiler Neto (2),*

*(1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFGRS, Brasil,*

*(2) Eletrobras Furnas, Brasil,*

lucascstassinari@gmail.com, dsanagiotto@ufrgs.br, luisalauffer@gmail.com, mmarques@iph.ufrgs.br,  
edtrier@furnas.com.br

**RESUMO:**

*A partir de estudos experimentais desenvolvidos ao longo dos anos, foi possível caracterizar o escoamento sobre diferentes configurações de vertedouros em degraus. Para estes estudos experimentais, devido às características do escoamento, utiliza-se a lei de semelhança de Froude. No entanto, ao utilizar água para os modelos físicos reduzidos, não são transpostos os efeitos de viscosidade e de tensão superficial no protótipo, acarretando erros na modelagem denominados efeitos de escala. Utilizando-se técnicas de modelagem numérica computacional, este trabalho tem como objetivo investigar o efeito de escala no escoamento sobre vertedouros em degraus, a partir do estudo de uma geometria em diferentes escalas. Primeiramente, utilizou-se o fluido água e semelhança apenas dos números de Froude e de Euler. Após, foram considerados diferentes fluidos hipotéticos, considerando a possibilidade da aplicação simultânea de semelhança de números de Froude, Reynolds, Euler e Weber e combinações destes. 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 ao considerar água em ambos. Ao considerar fluidos hipotéticos, que possibilitaram igualdade de outros adimensionais, os efeitos de escala reduziram, mostrando os efeitos devido às diferenças nos números de Reynolds e Weber na modelagem.*

**ABSTRACT:**

*Throughout experimental studies developed over the years, it was possible to characterize hydrodynamics of stepped spillways flowing. Due to these characteristics, it is common to use the Froude similitude law to modeling these hydraulic structures. However, when using water in both reduced and full scale model, we do not consider viscosity and surface tension effects, resulting errors in modeling called scale effects. By using numerical computational modeling techniques, this work aims to investigate scale effects on skimming flow over stepped spillways by using a unique geometry with different scales. Firstly, we have considered just water with Froude and Euler similitude. After, we have used hypothetical fluids with the simultaneous possibility of Froude, Reynolds, Euler and Weber similitude and combinations of those. This work showed that the scale effects that arise may result in considerable differences of pressures between reduced and full scale models, with differences of up to 1.3 m.H<sub>2</sub>O been observed when we have considered water in both scales. When considering hypothetical fluids with others similitudes, those effect scales got smaller. It shows how Reynolds and Weber similitudes affects modeling results.*

**PALAVRAS-CHAVE:** Vertedouros em Degraus; CFD; Efeitos de Escala.

## 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 (Tozzi, 1992; Chanson *et al.*, 2002; Sanagiotto, 2003; DaiPrá, 2004; Gomes, 2006; Amador *et al.*, 2009; Conterato *et al.*, 2015), 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 igualdade no número de Froude. 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 números de Reynolds nos modelos reduzidos muito inferiores àqueles do protótipo (Chanson, 2009) e, portanto, erros na modelagem (Sanagiotto, 2003), conhecidos como efeitos de escala.

Semelhança pode ser definida como o estudo da previsão das condições do protótipo a partir de observações efetuadas em modelos (Potter e Wiggert, 2004). 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 os números de Froude, Reynolds, Weber, Euler, Mach, Strouhal, entre outros.

Uma incerteza que se tem na modelagem experimental de modelos reduzidos é o efeito de escala, de forma que a ausência de efeitos de escala somente pode ser observada em escala real, quando são utilizados os mesmos fluidos (Pfister e Chanson, 2014; Felder e Chanson, 2017).

Heller (2011) apresenta uma revisão bibliográfica sobre critérios de escala e abordagens para minimizar os efeitos de escala na modelagem física em estudos dentro da engenharia hidráulica. Neste trabalho, o autor ressalta que a aceleração da gravidade nos modelos de Froude não está em escala, o que pode resultar em efeitos de escala.

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 da maioria das estruturas hidráulicas. Para 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 a escala geométrica 1:10 (Terrier, 2016; Heller, 2011).

Pfister e Chanson (2014) abordam os efeitos de escala em modelos físicos bifásicos ar-água, definindo valores mínimos de números de Weber e Reynolds, relacionados aos números de Froude e de Morton, de forma a que os efeitos da tensão superficial e das forças viscosas não são totalmente desprezados. Basicamente, aplicando-se um limite inferior para o número de Weber, de forma que  $We^{0,5} = 140$ , e com base no número de Morton, Pfister e Chanson (2014) apresentam em um gráfico uma relação entre os números de Reynolds e de Froude e indicam que, sendo usuais números de Froude entre 5 e 15 para escoamentos aerados sobre vertedouros, torna-se necessário ter números mínimos de Reynolds nos modelos variando entre  $1,5 \times 10^5$  e  $3,0 \times 10^5$ . Assim, conforme estes autores, ao utilizar modelos físicos pequenos, com escalas inferiores a 1:30, a entrada e o transporte de ar no fluido serão subestimados, pois, os efeitos da tensão superficial e das forças viscosas passam a ser super-representados no modelo, dado que o fluido utilizado é água, tanto no protótipo quanto no modelo.

No entanto, mesmo em modelos grandes, com escalas em 1:2 ou 1:3, parâmetros como o tamanho das bolhas ou as escalas de turbulência podem ser afetados por efeitos de escala (Pfister eChanson, 2014; Felder eChanson, 2017). Experimentos baseados na semelhança do número de Weber poderiam proporcionar melhores relações de escalas quanto ao tamanho das bolhas, mas, como a força da gravidade e as forças viscosas são mais importantes nos processos físicos relacionados ao escoamento sobre vertedouros em degraus, esse critério não é aplicável (Felder eChanson, 2017).

Teixeira (2008) estudou os possíveis efeitos de escala na previsão de pressões extremas junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico a partir de dados experimentais com modelos em escala 1:100; 1:50 e 1:32 e dados de protótipo. Com isso, constatou que os valores de pressão média medidos nos modelos resultam maiores que os dados do protótipo, provavelmente devido à aeração ser menor nos modelos do que no protótipo.

Ao estudar os efeitos de escala nas pressões instantâneas, Teixeira (2008) considerou que não existem efeitos de escala significativos na flutuação de pressão ao longo do ressalto, de forma que o processo de dissipação de energia ocorre de forma similar tanto no protótipo quanto nos modelos reduzidos.

Ao longo dos anos, modelos matemáticos têm sido propostos e aperfeiçoados para escoamentos turbulentos. Chenet *et al.* (2002) modelaram numericamente o escoamento sobre um vertedouro em degraus com 78,9 cm de altura total e declividade 1V:0,75H. Nesse trabalho, foram determinados os campos de velocidade e de pressão e a linha d'água, os quais foram confrontados com dados experimentais. Esses autores concluíram que simulações numéricas com o modelo de turbulência k- $\epsilon$  junto ao método VOF e com uma malha não estruturada são capazes de representar o escoamento sobre vertedouros em degraus.

Arantes (2007) aplicou o software comercial Ansys CFX para analisar as características de dissipação de energia, distribuição de velocidade e concentração de ar ao longo do escoamento sobre estruturas em degraus, perfis de pressão nos degraus e um estudo de cavitação. A partir disso, foi proposto um aerador de fundo com o objetivo de reduzir os riscos de cavitação ou, ainda, possibilitar aumentar as vazões máximas sobre o vertedouro.

Toro *et al.* (2016) realizaram simulações numéricas com o software OpenFOAM com foco na região não-aerada do escoamento, com ênfase nas estatísticas de turbulência. Os autores utilizaram diversos modelos de turbulência, entre eles o k- $\epsilon$ , com os quais chegaram a perfis de velocidade e de energia cinética turbulenta muito próximos àqueles verificados experimentalmente com PIV.

Desta forma, pode-se dizer que a modelagem numérica computacional representa uma importante ferramenta de análise detalhada de escoamentos, a qual proporciona flexibilidade para estudar estruturas hidráulicas com diferentes configurações: geometrias, escalas e fluidos, que seriam muitas vezes inviáveis utilizando a modelagem experimental.

Este trabalho busca, utilizando-se de modelagem numérica computacional, investigar o efeito de escala no escoamento turbulento sobre vertedouros em degraus, a partir do estudo de uma geometria em (1) diferentes escalas utilizando o fluido água e semelhança apenas dos números de Froude e de Euler e em (2) diferentes escalas com diferentes fluidos, considerando a possibilidade da aplicação simultânea de semelhança de números de Froude, Reynolds, Euler e Weber e combinações destes.

## METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho está dividida em descrição da estrutura, descrição do modelo numérico utilizado e definição das condições simuladas. A seguir, são apresentados esses itens.

### Descrição da Estrutura

Para este trabalho, considerou-se um protótipo com as seguintes características: vertedouro em degraus, com calha com declividade 1V:0,75H e degraus com altura (H) igual a 60 cm e comprimento (L) igual a 45 cm. O perfil Creager utilizado no protótipo é apresentado em Sanagiotto (2003) e descrito pela relação  $Y = 0,15389 \times X^{1,85}$ , definida com carga de projeto igual a 4,00 m.

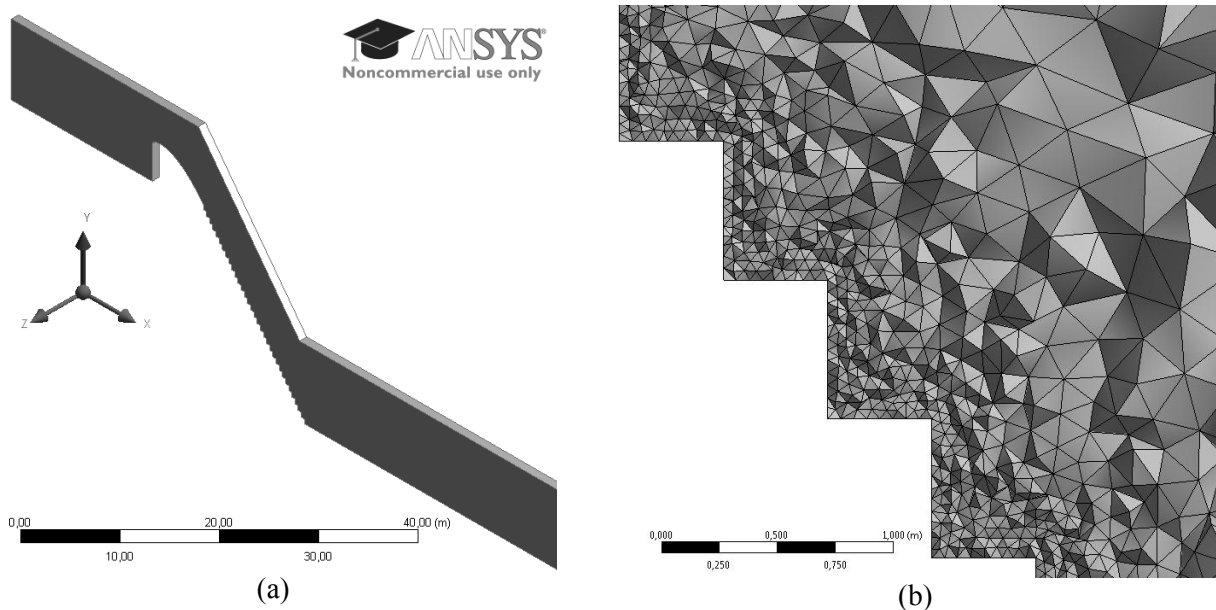
### Modelo Numérico

Foram realizadas simulações de escoamentos tridimensionais utilizando o software Ansys CFX, o qual utiliza o método dos volumes finitos para resolver as equações da continuidade e momentum (Ansys, 2013). Para este trabalho, modelou-se a turbulência a partir das equações da média de Reynolds para Navier-Stokes (RANS), com o modelo de turbulência k- $\epsilon$ .

Este modelo de turbulência, apresentado em Launder e Spalding (1974), é um modelo semi-empírico que se baseia nas equações de transporte de energia turbulenta (k) e na sua taxa de dissipação ( $\epsilon$ ) e possui um histórico de aplicações em trabalhos de simulação numérica de escoamentos sobre vertedouros em degraus (Chen *et al.*, 2002; Bombardelliet *al.*, 2011; Simões, 2012; Toro *et al.*, 2016).

O modelo multifásico adotado foi o homogêneo, com modelo de superfície livre na interface e coeficiente de tensão superficial variável, conforme justificado a seguir, em função do fluido considerado em cada simulação. A interface ar-água da superfície livre foi modelada com o método VOF (*Volume of Fluid*), que resolve um conjunto de equações de quantidade de movimento no domínio, armazenando o volume das duas fases em cada célula na forma de uma fração (Hirt e Nichols, 1981).

O domínio da simulação está apresentado na figura 1, assim como um exemplo de malha utilizada nas simulações. Como foram utilizadas escalas geométricas diferentes, com o objetivo de reduzir o impacto de diferentes malhas nos resultados, o critério utilizado para elaborá-las foi manter um número aproximado de nós e elementos para todas as geometrias. Neste caso, as malhas utilizadas possuem aproximadamente  $2,7 \times 10^5$  nós e  $1,4 \times 10^6$  elementos.



**Figura 1.-** (a) Domínio da simulação e (b) malha na região dos degraus – Escala de Protótipo.

### Definição das Condições Simuladas

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), Heller (2011) 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, resultando degraus com altura igual a 0,006 m, inferior ao limite recomendado de 0,02 m (Chanson *et al.*, 2002).

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.

Na sequência, é apresentado o desenvolvimento matemático considerado para definir as características dos fluidos hipotéticos para este estudo. Estes fluidos hipotéticos são assim chamados por apresentarem valores de viscosidade absoluta, massa específica e tensão superficial ar-fluido, que simultaneamente não são encontrados em nenhum outro fluido na natureza.

A partir do número de Froude ( $F$ ), apresentado na Eq. 1, considerando-se uma escala geométrica ( $\lambda$ ) e que a aceleração da gravidade ( $g$ ) é a mesma tanto para o modelo quanto para o protótipo, temos que a escala de velocidades ( $\lambda_v$ ) é aquela apresentada na Eq. 2, sendo  $L$  a variável de comprimento.

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad [1]$$

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda} \quad [2]$$

De forma a proporcionar semelhança nos efeitos das forças viscosas, definiu-se a escala de viscosidade cinemática ( $\lambda_v$ ) a partir da igualdade do número de Reynolds ( $R$ ) do protótipo com aquele do modelo. A Eq. 3 apresenta o número de Reynolds e a Eq. 4 a escala de viscosidade cinemática, sendo  $\nu$  a viscosidade cinemática.

$$R = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad [3]$$

$$\lambda_v = \lambda^{3/2} \quad [4]$$

Utilizando-se o número de Euler ( $E$ ), definido na Eq. 5, chegou-se a uma escala de variação de pressão ( $\lambda_{\Delta P}$ ) em função da escala geométrica e da escala de massa específica ( $\lambda_\rho$ ), conforme apresentado na Eq. 6, sendo  $\Delta P$  a pressão e  $\rho$  a massa específica.

$$E = \frac{V}{\sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P}{\rho}}} \quad [5]$$

$$\lambda_{\Delta P} = \lambda_\rho \cdot \lambda \quad [6]$$

A partir o número de Weber ( $W$ ), definido na Eq. 7, chegou-se a uma escala de tensão superficial ( $\lambda_\sigma$ ) em função da escala geométrica e da escala de massa específica, apresentada na Eq. 8, sendo  $\sigma$  a tensão superficial.

$$W = \frac{\rho \cdot V^2 \cdot L}{\sigma} \quad [7]$$

$$\lambda_\sigma = \lambda_\rho \cdot \lambda^2 \quad [8]$$

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 dos fluidos hipotéticos é igual à da água ( $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ ). Dessa forma, têm-se as escalas de pressão e de tensão superficial conforme apresentado nas Eqs. 9 e 10.

$$\lambda_{\Delta P} = \lambda \quad [9]$$

$$\lambda_\sigma = \lambda^2 \quad [10]$$

Neste contexto, foram realizadas simulações com CFD (*Computational Fluid Dynamics*) utilizando-se água escoando sobre uma geometria de vertedouro com três escalas diferentes, respeitando a lei de semelhança de Froude, e fluidos hipotéticos para duas escalas geométricas (1:10 e 1:100), com semelhanças em outros dois ou três adimensionais. Isso resultou em cinco condições iniciais 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.

Adicionalmente, foram feitas outras duas simulações para a escala 1:100 considerando-se simultaneamente a igualdade dos números de Froude, Euler e de Reynolds, apenas, e, após, a igualdade dos números de Froude, Euler e de Weber. A partir disso, buscou-se explicar qual é a relaxação mais importante aos efeitos de escala nos dados de pressão, em um escoamento aerado turbulento.

A tabela 1 apresenta as condições simuladas, assim como as características da água e dos fluidos hipotéticos utilizados em cada simulação. A tabela 2 apresenta os valores dos números adimensionais utilizados, calculados na seção da crista do vertedouro, sendo tomadas  $L$  e  $\Delta P/\gamma$  como sendo a lâmina crítica ( $h_c = 2,17m$ , no protótipo) e  $V$  como sendo a velocidade crítica ( $V_c = 4,61 m/s$ , no protótipo).

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. Todas as simulações contaram com uma vazão específica, em escala de protótipo, igual a  $10 m^3/(s.m)$ .

**Tabela 1.-** Características das condições testadas

Código da condição testada: Escala+semelhança	Escala	Fluido	Critério semelhança	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]
$\lambda 1$ F	1:1	água	F, E	997,0	$8,9 \times 10^{-7}$	$8,9 \times 10^{-4}$	0,07230
$\lambda 10$ F	1:10	água	F, E	997,0	$8,9 \times 10^{-7}$	$8,9 \times 10^{-4}$	0,07230
$\lambda 100$ F	1:100	água	F, E	997,0	$8,9 \times 10^{-7}$	$8,9 \times 10^{-4}$	0,07230
$\lambda 10$ FERW	1:10	hipotético	F, E, R, W	997,0	$2,8 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-5}$	0,00072
$\lambda 100$ FERW	1:100	hipotético	F, E, R, W	997,0	$8,9 \times 10^{-10}$	$8,9 \times 10^{-7}$	$7,2 \times 10^{-6}$
$\lambda 100$ FEW	1:100	hipotético	F, E, W	997,0	$8,9 \times 10^{-7}$	$8,9 \times 10^{-4}$	$7,2 \times 10^{-6}$
$\lambda 100$ FER	1:100	hipotético	F, E, R	997,0	$8,9 \times 10^{-10}$	$8,9 \times 10^{-7}$	0,07230

F = número de Froude, E = número de Euler, R = número de Reynolds, W = número de Weber

**Tabela 2.-** Números adimensionais das simulações

Código	R	W	E
$\lambda 1$ F	$1,1 \times 10^7$	$6,4 \times 10^5$	69,9
$\lambda 10$ F	$3,6 \times 10^5$	$6,4 \times 10^3$	69,9
$\lambda 100$ F	$1,1 \times 10^4$	$6,4 \times 10^1$	69,9
$\lambda 10$ FERW	$1,1 \times 10^7$	$6,4 \times 10^5$	69,9
$\lambda 100$ FERW	$1,1 \times 10^7$	$6,4 \times 10^5$	69,9
$\lambda 100$ FEW	$1,1 \times 10^4$	$6,4 \times 10^5$	69,9
$\lambda 100$ FER	$1,1 \times 10^7$	$6,4 \times 10^1$	69,9

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nesse trabalho, independente das condições analisadas, apresentam um comportamento de distribuições de carga de pressão de acordo com o esperado, com base em outros trabalhos (Chenet *al.*, 2002; Sanagiotto, 2003; Arantes, 2007). Ou seja, nos espelhos dos degraus há um extremo de pressão negativa próximo à quina do degrau, enquanto que nos patamares há um extremo de pressão positiva também próximo à quina.

As figuras 2 e 3 apresentam as pressões obtidas nas simulações para o espelho e para o patamar do degrau 24, considerando-se que os degraus estão numerados de cima para baixo. 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), que se situa aproximadamente entre os degraus 18 e 26.

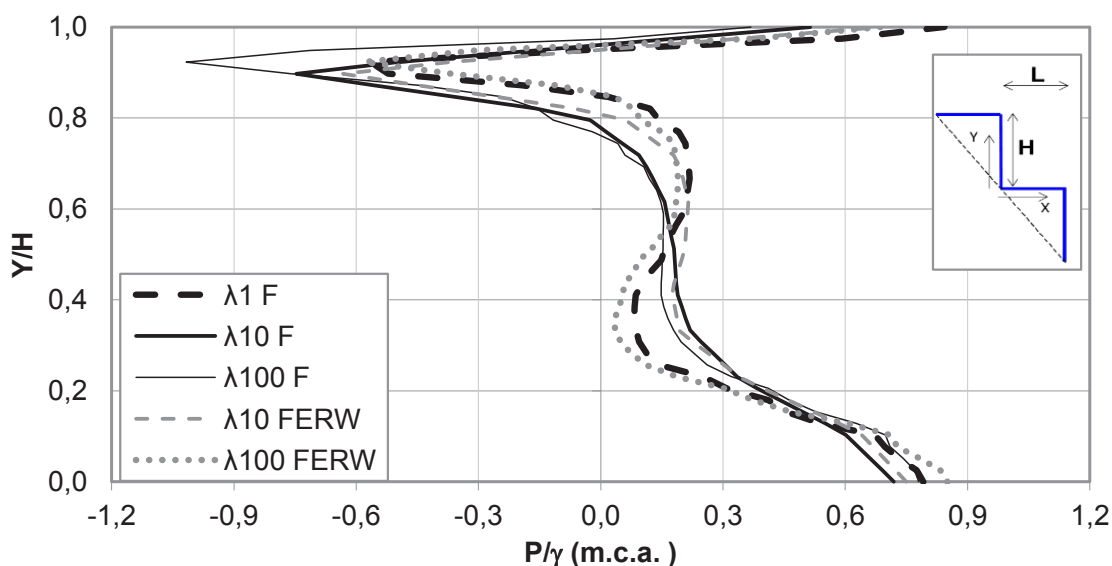


Figura 2.- Cargas de pressão no espelho do degrau 24. Zona aerada.

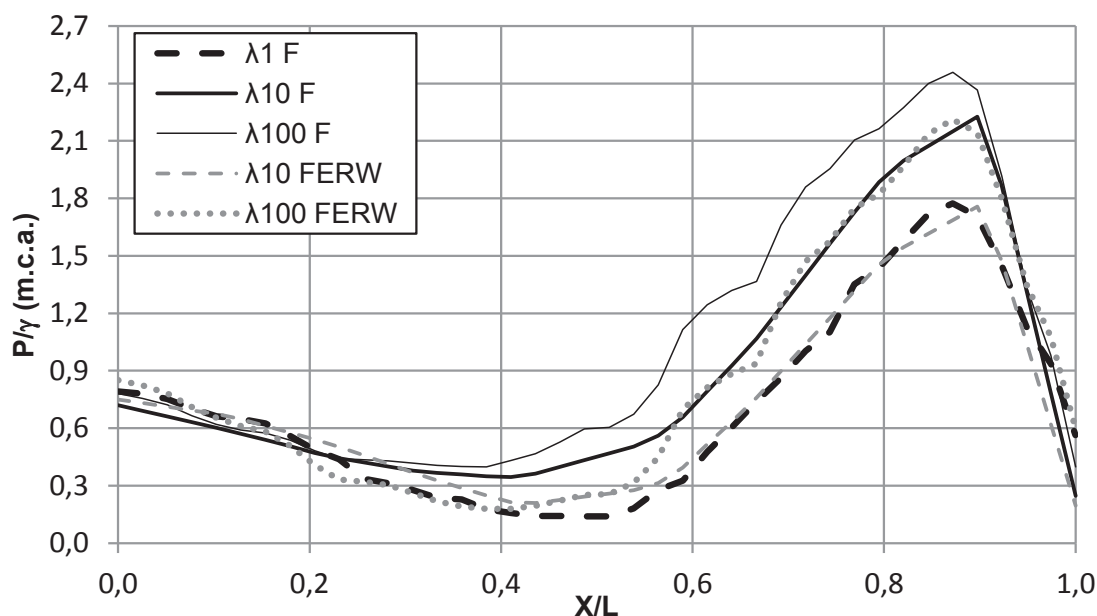


Figura 3.- Cargas de pressão no patamar do degrau 24. Zona aerada.

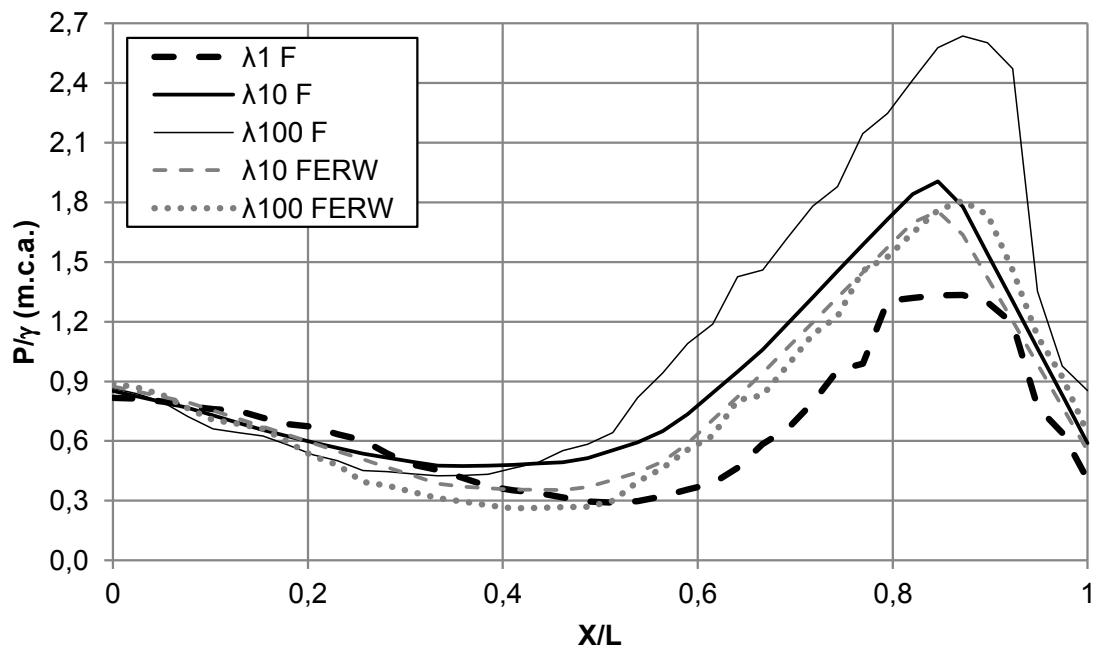
Analisando-se apenas os resultados obtidos para as simulações com água, observa-se que quanto menor é a escala considerada, maior é a magnitude da pressão negativa que ocorre na parte superior do espelho ( $Y/H \cong 0,9$ ) e maior é a pressão positiva que ocorre próximo à quina do patamar ( $X/L \cong 0,85$ ). 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.

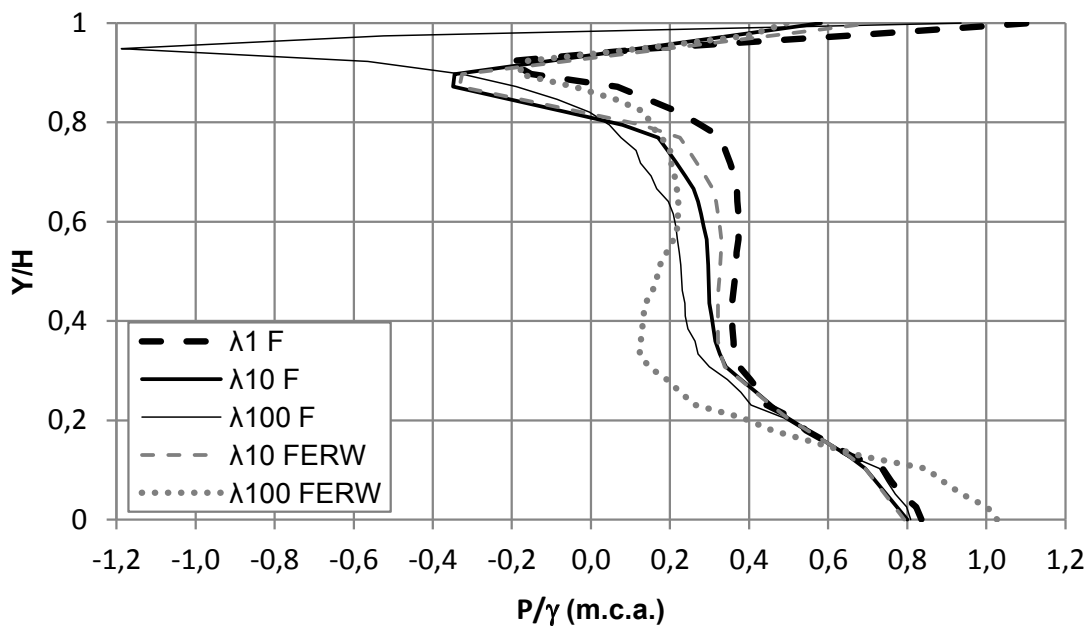
Comparando-se os resultados entre as simulações com água com escalas 1:100 e 1:1, nas figuras 2 e 3, chegou-se a diferenças entre pressões médias extremas de -0,45 m.c.a. e 0,68 m.c.a., para o espelho e para o patamar do degrau 24, respectivamente. Contudo, ao analisar as diferenças entre a simulação 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.



As maiores diferenças observadas nas simulações com diferentes escalas para a vazão de  $10 \text{ m}^3/(\text{s.m})$  foram  $1,31 \text{ m.c.a.}$  no patamar do degrau 18 (figura 4) e  $-0,98 \text{ m.c.a.}$  para o espelho do degrau 12 (figura 5). Em ambos os casos, as maiores diferenças ocorreram na comparação do protótipo com o modelo na escala 1:100 com água.



**Figura 4.-** Cargas de pressão no patamar do degrau 18. Maiores diferenças na comparação entre protótipo e modelos.



**Figura 5.-** Cargas de pressão no espelho do degrau 12. Maiores diferenças na comparação entre protótipo e modelos.

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  $1,3 \text{ m.c.a.}$ , quando comparadas, em escala de protótipo, as pressões obtidas nas simulações  $\lambda 1 \text{ Fe}$   $\lambda 100 \text{ F}$ , para vazão de  $10 \text{ m}^3/(\text{s.m})$ .

Visando à compreensão de qual característica do fluido apresenta maior representatividade nos efeitos de escala, foram feitas simulações com diferentes fluidos de forma a se ter relaxações diferentes.

As figuras 6 e 7 apresentam as pressões obtidas para o espelho e para o patamar do degrau 24, para a vazão específica de  $10 \text{ m}^3/(\text{s.m})$ , referente ao protótipo, para quatro fluidos diferentes, com características apresentadas na tabela 1. Nessas figuras, os gráficos foram aproximados na região de maior interesse ao estudo, onde há as pressões extremas.

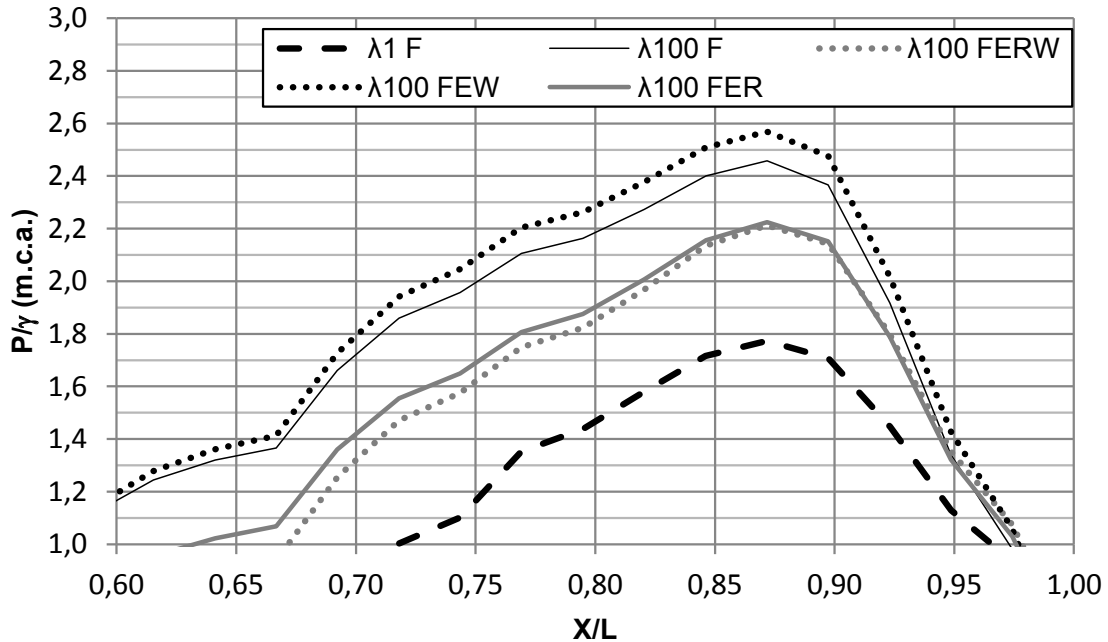


Figura 6.- Cargas de pressão no patamar do degrau 24 para simulações com diferentes relaxações. Zona aerada.

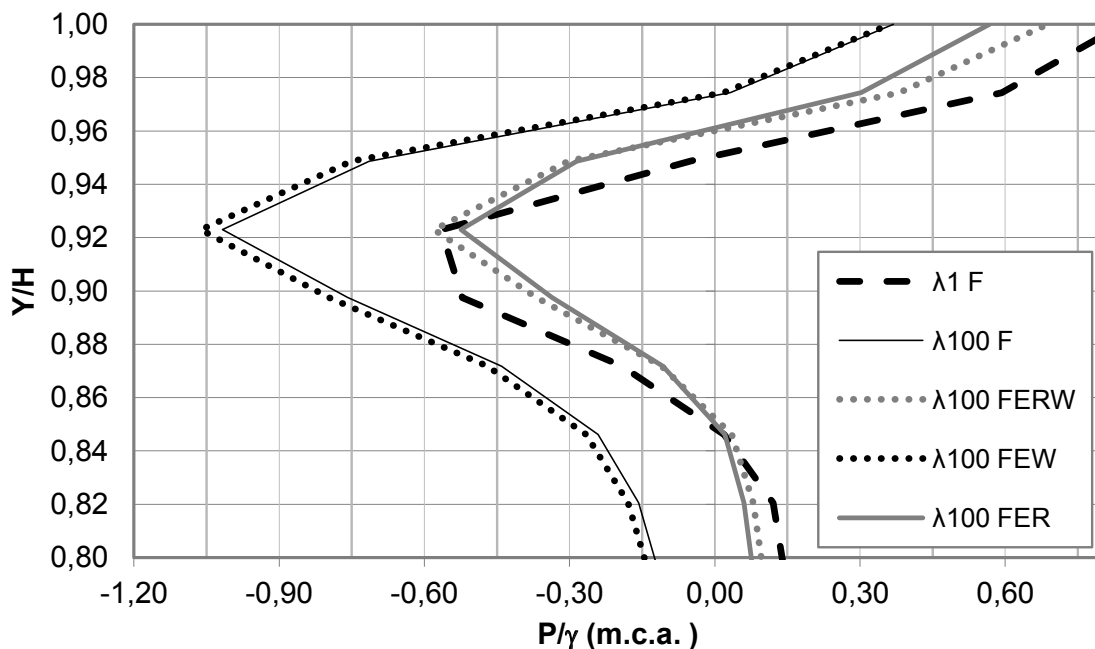


Figura 7.- Cargas de pressão no espelho do degrau 24 para simulações com diferentes relaxações. Zona aerada.

Conforme apresentado na tabela 1, a simulação  $\lambda 100 \text{ FEW}$  foi feita em escala 1:100 com um fluido hipotético respeitando a igualdade dos números de Froude, Euler e Weber, ou seja, houve relaxação do número de Reynolds. Com base nessa análise, verifica-se que a manutenção da

semelhança no número de Reynolds é essencial para que as pressões negativas extremas no espelho e para que as pressões máximas positivas nos patamares se aproximem dos valores resultantes da simulação em escala de protótipo. Por outro lado, em termos de pressões médias, a igualdade de Weber não se mostrou importante, visto que os resultados obtidos na condição em que o número de Weber não é considerado ( $\lambda 100\text{FER}$ ) são muito próximos aos obtidos para a escala de protótipo.

Contudo, salienta-se que as análises aqui apresentadas se resumem ao estudo de pressões junto à calha em degraus (patamares e espelhos). Portanto, não foram analisados perfis de velocidades e de fração de ar, nem pressões instantâneas.

## 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 entre protótipo e o modelo reduzido em escala 1:100 com semelhança de Froude para uma vazão específica igual a  $10 \text{ m}^3/(\text{s.m})$ . No entanto, comparando-se as diferenças entre protótipo e modelo com escala 1:10, para esta mesma vazão, chegou-se a uma diferença máxima igual a 0,79 m.c.a., para o patamar do degrau 12. As diferenças de pressão observadas nos espelhos são inferiores, havendo um valor máximo igual a 0,18 m.c.a. para a escala 1:10 no degrau 24 e 0,98 m.c.a. para a escala 1:100 no degrau 12.

Ao considerar os fluidos hipotéticos, chegou-se a diferenças absolutas menores, conforme apresentado nas figuras 2, 3, 4 e 5. Isso mostra que a alteração nas características dos fluidos para se ter semelhança em outras forças além da gravitacional possui grande potencial, na modelagem numérica, resultando valores mais próximos daqueles obtidos ao simular o protótipo, mesmo que os fluidos hipotéticos considerados não existam na natureza.

Dessa forma, a utilização de modelos reduzidos para estimar pressões em estruturas hidráulicas, neste caso, induziu a situações mais críticas do que àquelas 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) para bacias de dissipação por ressalto hidráulico.

Ao buscar a compreensão do efeito da relaxação dos números de Reynolds e de Weber, individualmente, verificou-se grande importância na semelhança de Reynolds para que o escoamento com o fluido hipotético resulte pressões mais próximas àquelas do protótipo. Nesta mesma análise, ao relaxar o número de Weber, para as condições simuladas, as pressões médias foram bastante similares àquelas obtidas ao simular com um fluido com semelhança dinâmica, mostrando que os efeitos de escala nas pressões médias para o escoamento no vertedouro em degraus decorrem principalmente da relaxação do número de Reynolds.

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, sendo estes resultados preliminares.

## 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. Este trabalho também recebeu apoio financeiro parcial da CAPES-Brasil, do CNPq e da Propesq/UFRGS, pelo qual os autores agradecem.

## REFERÊNCIAS

- Ansys** (2013). *ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 15.0*. Ansys, Inc., Canonsburg, PA.
- Arantes, E. J.** (2007). *Caracterização do Escoamento Sobre Vertedouros em Degraus Via CFD*, Tese. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Amador, A., Sánchez-Juny, M., Dolz, J.** (2009). “Developing Flow Region and Pressure Fluctuations on Steeply Sloping Stepped Spillways”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 12, pp. 1092-1100.
- Bombardelli, F. A., Meireles, I., Matos, J.** (2011). “Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways”. *Environ. Fluid Mech.* Vol. 11, No. 3, pp. 263-288.
- Chanson, H.** (2009). “Turbulent air-water flows in hydraulic structures: Dynamic similarity and scale effects”. *Environ. Fluid. Mech.*, Vol. 9, pp. 125-142.
- 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.
- Chen, Q., Dai, G., Liu, H.** (2002). “Volume of Fluid for Turbulence Numerical Simulation of Stepped Spillway Overflow”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 7, pp. 683-688.
- Conterato, E., Marques, M. G., Alves, A. A. M.** (2015). “Proposta de uniformização das equações de previsão das características do escoamento sobre a calha de um vertedouro em degraus”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH*, Vol. 20, No. 1, pp. 131-137.
- Dai Prá, M.** (2004). *Características do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade IV:1H*, Dissertação. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre.
- Felder, S., Chanson, H.** (2017). “Scale effects in microscopic air-water flow properties in high-velocity free-surface flows”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 83, pp. 19-36.
- Gomes, J. F.** (2006). *Campo de pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade IV:0,75H*, Tese. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre.
- Heller, V.** (2011). “Scale effects in physical hydraulic engineering models”. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 49, No. 3, pp. 293-306.
- Hirt, C. W., Nichols, B. D.** (1981). “Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries”. *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201-225.
- Lauder, B. E., Spalding, D. B.** (1974). “The Numerical Computation of Turbulent Flows”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, pp. 269-289.
- Pfister, M., Chanson, H.** (2014). “Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling”. *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 26, No. 2, pp. 291-298.
- 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 IV:0.75H*, Dissertação. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre.
- Simões, A. L. A.** (2012). *Escoamentos Turbulentos em Canais com o Fundo em Degraus: resultados experimentais, soluções numéricas e proposições teóricas*, Tese. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- 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.
- Toro, J. P., Bombardelli, F. A., Paik, J., Meireles, I., Amador, A.** (2016). “Characterization of turbulence statistics on the non-aerated skimming flow over stepped spillways: a numerical study”. *Environ. Fluid Mech.* Vol. 16, pp. 1195-1221.
- Tozzi, M. J.** (1992). *Caracterização/comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus*, Tese. Universidade de São Paulo, São Paulo.