

XXX CLH

CONGRESO LATINOAMERICANO
DE HIDRAULICA | BRASIL | 2022

ANALES

- VOLÚMEN 1 -

MECÁNICA DE LOS FLUIDOS E HIDRÁULICA
FUNDAMENTAL



IAHR



AIRH

International Association
for Hydro-Environment
Engineering and Research

Hosted by
Spain Water and IWHR, China

Organizadores

Dr. Cristiano Poletto - UFRGS (Presidente)

Dr. José Gilberto Dalfré Filho - UNICAMP

Dr. André Luís Sotero Salustiano Martim - UNICAMP

**ANALES DEL
XXX CONGRESO LATINOAMERICANO DE
HIDRÁULICA 2022**

**- VOLÚMEN 1 -
MECÁNICA DE LOS FLUIDOS E HIDRÁULICA
FUNDAMENTAL**



Madrid – España
2023

Copyright © 2023, by IAHR Publishing.

Derechos Reservados en 2023 por **IAHR Publishing.**

Montaje: Cristiano Poletto

Organización General de la Obra: Cristiano Poletto; José Gilberto Dalfré Filho;
André Luís Sotero Salustiano Martim

Maquetación: Juliane Fagotti; Cícero Manz Fagotti

Relectura General: Elissandro Voigt Beier

Portada: Juliane Fagotti

Cristiano Poletto; José Gilberto Dalfré Filho; André Luís Sotero Salustiano Martim
(Organizadores)

ANALES del XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – VOLÚMEN 1 –
MECÁNICA DE LOS FLUIDOS E HIDRÁULICA FUNDAMENTAL / Organizadores:
Cristiano Poletto; José Gilberto Dalfré Filho; André Luís Sotero Salustiano Martim –
MADRI, España: IAHR Publishing, 2023.

380p.: il.;

ISBN • 978-90-832612-2-5

*ES AUTORIZADA la libre reproducción, total o parcial, por cualquier medio, sin
autorización escrita del Editor o de los Organizadores.*

COMPARAÇÃO DE LÂMINA DE ÁGUA DE MODELO FÍSICO 1:40 FRENTE A METODOLOGIAS DE PREVISÃO DE AERAÇÃO EM CALHAS EM DEGRAUS

Éricson Rojahn¹, Lucas Fontanetti Martins², Luisa da Cunha Vieira³, Marcelo Riul⁴, José Carlos de Melo Bernardino⁵, Lucas Samuel Santos Brasil⁶ & Marcelo Giulian Marques⁷.

- 1) ER Projetos de Engenharia, RS/Brasil, ericson.rojahn@gmail.com
- 2) FCTH, SP/Brasil, lucas.fontanetti@fcth.br
- 3) BVP Geotecnia e Hidrotecnia, MG/Brasil, luisa.vieira@bvp.eng.br
- 4) BVP Geotecnia e Hidrotecnia, MG/Brasil, marcelo.riul@bvp.eng.br
- 5) Universidade de São Paulo (USP), SP/Brasil, jcarlosmbernardino@usp.br
- 6) GWS Engenharia, MG/Brasil, lucas.brasil@gwsengenharia.com.br
- 7) REM Serviços de Engenharia LTDA, RS/Brasil, mmarques@iph.ufrgs.br

RESUMO:

Este trabalho utilizou resultados de lâmina de água proveniente de modelo físico reduzido com escala geométrica 1:40 de calha em degraus, comparando-os com metodologias empíricas de previsão de aeração disponíveis na literatura. A calha, a nível de protótipo, possui degrau com altura de 0,50 m e inclinação de 24,4°. As vazões específicas variaram de 7,3 a 20,0 m²/s. Os resultados do modelo foram também confrontados com a altura de água não-aerada, em que os primeiros, para todos os casos, mostraram-se maiores, chegando a atingir a diferença máxima de 13%. A altura de água no ponto de início de aeração foi também avaliada, sendo que o modelo reduzido mostrou resultados acima dos estimados, com diferença de até 18%. Avaliou-se por fim, o fator de correção associado à aeração do escoamento, a ser aplicado à lâmina não-aerada, e constatou-se que para vazões específicas na faixa de $10 \leq q \leq 20$ m²/s esse fator pode ser aproximado por 1,4 para o canal estudado. Todas as avaliações reforçaram a importância dos estudos em modelo reduzido para projetos hidráulicos de engenharia, já que confirmaram, na prática, que metodologias empíricas de previsão, mesmo quando adequadas a determinada estrutura, podem sugerir resultados sensivelmente distintos dos do modelo físico.

ABSTRACT:

This work used water depth results from a reduced physical model with a 1:40 geometric scale of a stepped chute, comparing them with empirical methodologies of aeration prediction available in the literature. The chute at the prototype level has a step height of 0,50 m and an inclination of 24,4°. The specific flows ranged from 7,3 to 20,0 m²/s. The model results were also compared with the height of non-aerated water, in which the first, for all cases, were higher, reaching a maximum difference of 13%. The water height at the starting point of aeration was also evaluated, and the reduced model showed results above those estimated, with a difference of up to 18%. Finally, the correction factor associated with the aeration of the flow, to be applied to the non-aerated sheet, was evaluated, and it was found that for specific flows in the range of $10 \leq q \leq 20$ m²/s this factor can be approximated by 1,4 for the studied channel. All evaluations reinforced the importance of studies in a reduced model for hydraulic engineering projects, as they confirmed, in practice, that empirical forecasting methodologies, even when appropriate to a given structure, can suggest significantly lower results than the physical model.

PALAVRAS-CHAVE: Aeração; modelo físico reduzido; calha em degraus.

INTRODUÇÃO

Escoamentos do tipo *skimming flow*, denominado por Matos e Quintela (1995) como “deslizante sobre turbilhões”, ocorrem principalmente em vertedouros em degraus com elevadas declividades e vazões específicas. Esse tipo de escoamento forma vórtices na cavidade limitada pela superfície do degrau e o pseudofundo, o que fornece sustentação ao fluxo deslizante. Por conta das altas velocidades do escoamento, a lâmina de água sofre aeração, aumentando sua altura e exigindo, em projetos de engenharia, que os muros laterais contenham essa expansão.

Neste trabalho foi utilizado modelo físico reduzido de canal de drenagem com vertedouro em degraus, em escala geométrica 1:40, construído com o critério de semelhança de Froude. Esse critério, conforme observado por Chanson (2009), é o mais utilizado para estudos em escoamentos de superfície livre, já que a ação gravitacional é dominante. No entanto, conforme Heller (2011), esse tipo de semelhança, aliado à escala 1:40 empregada, tem baixa capacidade de representação da entrada de ar no escoamento. Experimentos conduzidos por Boes (2000), para vazões específicas de até 20 m²/s e altura de degrau de até 0,6 m, mostraram que o efeito de aeração em vertedouros, para ser representativo, exige modelos reduzidos, no mínimo, entre 1:10 e 1:15, caso contrário, ocorrerá o que se chama de *efeito escala*. Boes (2000) destaca que escalas menores são sim representativas para propósitos de projeto, exceto para a determinação da altura dos muros em trechos em degraus.

Por conta da existência desse efeito escala no modelo, o presente estudo utilizou metodologia para previsão da altura da lâmina aerada, visando determinar a dimensão segura dos muros laterais.

O modelo físico reduzido utilizado possui vertedouro com seção transversal retangular, ângulo de inclinação $\alpha = 24,44^\circ$ e degraus com rugosidade $k = 0,455$ m. Para todas as vazões ensaiadas, o comportamento identificado foi tipicamente *skimming flow*.

CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

A representação matemática dos vários aspectos do escoamento deslizante sobre turbilhões já foi objeto de estudo de diversos pesquisadores, podendo-se citar os trabalhos de Matos (1999), Boes e Hager (2003) e a compilação de estudos de Minor e Hager (2000).

Por conta das características da escada estudada, com declividade 1V:2,2H ($\alpha = 24,44^\circ$), foram utilizadas as equações [1] e [2] para previsão do ponto de início de aeração, propostas por Hunt e Kadavy (2013), válidas para $\alpha \leq 26,6^\circ$, e baseadas em dados de diversos autores.

$$\frac{L_i}{k} = 5,19F_*^{0.89} \rightarrow 0,1 < F_* \leq 28 \quad [1]$$

$$\frac{L_i}{k} = 7,48F_*^{0.78} \rightarrow 28 < F_* \leq 10^5 \quad [2]$$

Nessas equações, vale L_i o comprimento desde o início do trecho em degraus até o ponto de início de aeração, k a rugosidade dos degraus e F_* o Froude rugoso, calculado como $F_* = q/\sqrt{gk^3 \sin \alpha}$, onde q representa a vazão específica e g a aceleração da gravidade. Hunt e Kadavy (2013) destacam que para $F_* \geq 28$ o comportamento dos dados mostra decréscimo na taxa de L_i/k , quando os degraus não mais são percebidos como tais pelo escoamento, mas aproximam-se de uma simples superfície rugosa, o que reflete diretamente no ponto de início de aeração. Desse modo, em comparação à equação [1], L_i da equação [2] avança para jusante mais lentamente com o aumento de F_* .

Hunt et al. (2013) apud Rosa et al. (2018), para o mesmo intervalo de α , propuseram as equações [3] e [4] para previsão da concentração média de ar no trecho aerado, válidas para $0,9 \leq d_c/h_d \leq$

28,6, sendo h_d a altura do degrau e d_c a altura crítica do escoamento. Vale observar que essa concentração média se refere a cada seção posicionada na distância longitudinal L ao longo da calha.

$$C_m = 0,1745 - \frac{0,22}{L/L_i} + \frac{0,216}{d_c/h_d} + 0,453 \sin \alpha \rightarrow 1,0 \leq L/L_i \leq 2,0 \quad [3]$$

$$C_m = 0,0645 + \frac{0,216}{d_c/h_d} + 0,453 \sin \alpha \rightarrow L/L_i > 2,0 \quad [4]$$

Hunt et al. (2013) apud Rosa et al. (2018), para $10^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$, também propuseram expressão para previsão de y/d_c (y exprime a lâmina não-aerada correspondente), representada pela equação [5], válida para $0,035 \leq h_d/d_c \leq 1,1$ e $L/L_i \geq 1,0$.

$$\frac{y}{d_c} = 0,34 \left(\frac{k}{d_c} \right)^{0,063} (\sin \alpha)^{-0,18} \quad [5]$$

Para o intervalo $0,1 \leq L/L_i < 1$ e considerando as mesmas faixas de validade para α e h_d/d_c , Hunt et al. (2013) apud Rosa et al. (2018) propuseram a equação [6] para cálculo de y/d_c . Em relação a [5], a equação [6] acrescenta dependência de L/L_i , que varia rapidamente de 1,66, em $L/L_i = 0,1$, até a unidade, quando $L/L_i = 1$.

$$\frac{y}{d_c} = \left(\frac{L}{L_i} \right)^{-0,22} \left[0,34 \left(\frac{k}{d_c} \right)^{0,063} (\sin \alpha)^{-0,18} \right] \quad [6]$$

No ponto de início de aeração, a profundidade da lâmina de água é representada por d_i . Hunt e Kadavy (2014) propuseram a equação [7] para estimativa de d_i , válida para $\alpha \leq 26,6^\circ$.

$$\frac{d_i}{k} = 0,34 (\sin \alpha)^{0,13} F_*^{0,62} \quad [7]$$

Dado que o escoamento sofre incorporação de ar a partir de L_i , a altura de água y tem de ser corrigida, o que pode ser realizado considerando-se a concentração média C_m . Essa correção é necessária para avaliação da altura dos muros laterais do canal, que devem conter a expansão sofrida pela água. Diversos autores, como Chanson e Toombes (2002) e Boes e Hager (2003), adotam a altura relativa à concentração de 90%, y_{90} , para realizar a correção de y . Dessa forma, y_{90} pode ser calculado pela equação [8].

$$y_{90} = \frac{y}{1 - C_m} \quad [8]$$

Boes e Hager (2003) propuseram a equação [9] para y_{90} , que, embora tenha formato simplificado em relação a [8], considera intrinsecamente os mesmos parâmetros básicos na sua formulação: q , h_d e α . Representação visual dessas duas equações para dois valores de α é mostrada pela Figura 10, onde nota-se clara paridade entre os resultados. Em especial, para $\alpha = 26,6^\circ$, as curvas praticamente se sobrepõem.

$$\frac{y_{90}}{h_d} = 0,50 F_*^{(0,5+0,1 \tan \alpha)} \quad [9]$$

A equação [8] tem a vantagem de explicitar os principais termos fisicamente responsáveis pela magnitude y_{90} , através da lâmina de água y e pela concentração média de ar C_m . Por outro lado, a equação [9] toma formato mais condensado, sem apelar a características sensíveis do escoamento, embora seja tão matematicamente responsiva quanto [8].

É importante observar que, dada a existência do modelo físico 1:40, o valor de y na equação [8] pode ser proveniente das leituras do próprio modelo ou por cálculo da equação [5]. No primeiro caso, obtém-se resultado de y_{90} para determinação da altura otimizada dos muros laterais, o que é especialmente importante para o projeto de engenharia do canal em estudo. Por outro lado, o segundo caso fornece a estimativa que seria obtida caso não existisse o modelo físico e, portanto, a determinação da altura dos muros laterais exigiria maior borda livre.

A nível de projeto, de modo geral e para canais de drenagem, a altura dos muros laterais, H , no trecho aerado, pode ser estimada como $H = n \cdot y_{90}$, sendo n um coeficiente de segurança variável entre 1,4 e 1,5 (ROSA et al., 2018). Porém, considerando a existência de modelo físico, n pode ser otimizado para 1,2.

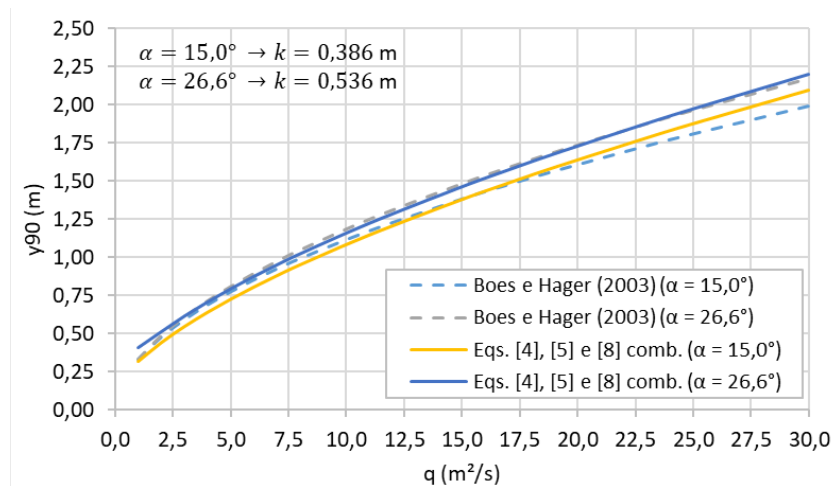


Figura 10 – Comparação entre equação [9], apresentada por Boes e Hager (2003), e equação [8] combinada com equações [4] e [5], para avaliação de y_{90} .

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL: MODELO FÍSICO REDUZIDO (1:40)

Foram ensaiadas vazões em modelo físico reduzido com calha em degraus (Figura 11), com medições de lâmina de água e velocidade. As características da estrutura, em dimensões de protótipo, são apresentadas na Tabela 4. O modelo foi construído com escala geométrica de 1:40 considerando o critério de semelhança de Froude. As vazões ensaiadas foram medidas por vertedor triangular, e as profundidades por ponta linimétrica. Sua alimentação se deu por gravidade, a partir de reservatório superior de nível constante.

As leituras realizadas no modelo físico ocorreram para diversas vazões específicas, desde $7,3$ m^2/s até $20,0$ m^2/s , todas operando em regime permanente. Os pontos de leitura foram espaçados de dez em dez degraus, permitindo a elaboração de um perfil representativo do comportamento hidráulico.

As alturas de lâmina de água, em dimensão de protótipo, são apresentadas na Tabela 5 para a faixa de degraus significativa às análises deste estudo. Esses resultados representam a média de leituras realizadas na margem esquerda e direita da calha, e são apresentados até o degrau 60 porque a partir dessa região constatou-se valor constante de y , configurando, grosso modo, regime uniforme. Como esperado, não foi observada aeração significativa no escoamento do modelo reduzido durante

os ensaios. Junto à Tabela 5 estão indicados também os respectivos valores da altura crítica (h_c), do número de Froude rugoso (F_*) e do comprimento L_i .

Tabela 4 – Características a nível de protótipo da calha em degraus estudada.

Características de protótipo	
Largura (m)	13,0
Ângulo de inclinação (graus)	24,4
Número de degraus	140
Altura do degrau (m)	0,50
Rugosidade do degrau (m)	0,455



Figura 11 – Vista superior do modelo físico reduzido da calha em degraus.

Tabela 5 – Altura de lâmina de água y , em dimensões de protótipo, baseadas nas leituras do modelo físico, para as diferentes vazões analisadas. L_i foi determinado pela metodologia de Hunt e Kadavy (2013).

q (m ² /s)	h_c (m)	F_*	L_i (deg.)	y (m)					
				Deg. 10	Deg. 20	Deg. 30	Deg. 40	Deg. 50	Deg. 60
7,3	3,51	11,8	18	0,90	0,70	0,75	0,70	0,70	0,70
11,0	2,31	17,8	26	1,15	1,00	1,00	1,00	0,95	0,95
15,7	2,93	25,4	35	1,55	1,20	1,15	1,10	1,10	1,10
20,0	3,44	32,3	43	1,90	1,50	1,45	1,40	1,30	1,30

RESULTADOS

Para avaliação dos resultados foram considerados três abordagens, considerando as equações empíricas apresentadas acima e as leituras realizadas no modelo físico:

- Resultado da equação [8], considerando y estimado pela equação [5] e C_m pelas equações [3] e [4]. Nessa situação, apenas previsões empíricas são levadas em conta, representando cenário em que não existiriam as informações do modelo físico.
- Resultados do modelo físico convertidos para nível de protótipo. Nessa situação, apenas as leituras do modelo foram utilizadas, representando o que foi visualizado nos ensaios.
- Equação [5] unicamente, que representa a lâmina de água não aerada e, portanto, tem paridade direta às leituras do modelo. Sua consideração é especialmente importante para compará-la aos resultados do modelo. Junto a isso, foram comparadas também as leituras do modelo com as profundidades d_i calculadas pela equação [7].

Os resultados para as vazões específicas de 20,0 m²/s, 15,7 m²/s e 11,0 m²/s, coletados no modelo físico e convertidos para nível de protótipo, são representados na Figura 12, onde também são mostradas as previsões da lâmina aerada que deverão ser visualizadas em protótipo, segundo resultados da equação [8] combinada com [3], [4] e [5]. Para as três vazões mostradas, a lâmina no início da aeração teve boa proximidade com aquela lida no modelo, com diferença máxima de $\approx 26\%$, para a vazão de 15,7 m²/s. Nota-se também que o início previsto da aeração se aproxima bem ao início do trecho em regime uniforme do modelo. Esses resultados demonstram boa aderência entre o modelo físico e a metodologia empregada.

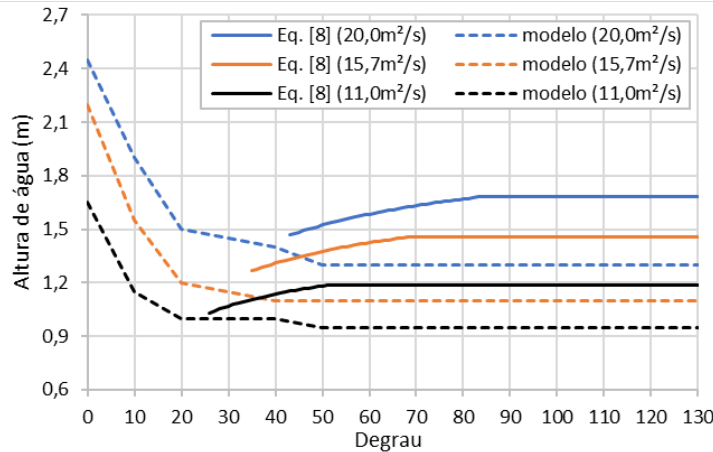


Figura 12 – Resultados de lâmina de água lida em modelo físico (1:40) e da equação [8] a partir do ponto de início da aeração ($L/L_i \geq 1$).

A Figura 13 mostra o comportamento da lâmina do modelo físico para o trecho uniforme em comparação aos resultados da equação [5]. Como se vê, para todas as vazões o modelo apresentou lâmina superior à calculada, chegando a atingir a diferença de 13%, confirmando a importância de verificações em modelo para projetos de engenharia mais seguros. Em especial, esse resultado indica que as linhas cheias da Figura 12, caso tivessem sido determinadas com uso das leituras do modelo, mostrariam alturas de água maiores. É certo, no entanto, que parte dessa diferença ilustrada pela Figura 13 é proveniente de alguma incorporação de ar no escoamento do modelo.

Considerando que o início de aeração ocorresse nas posições L_i listadas na Tabela 5, a altura de água correspondente do modelo físico foi comparada aos resultados de d_i da equação [7], como representado na Figura 14. Nesse caso, a altura calculada chegou a diferir em 18% da altura do modelo.

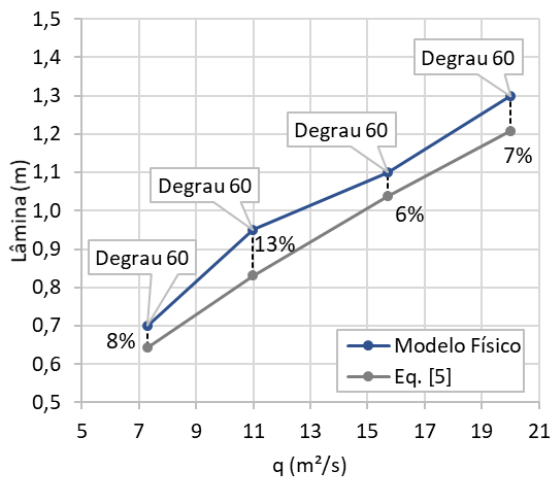


Figura 13 – Comparação entre resultados do modelo físico e da equação [5].

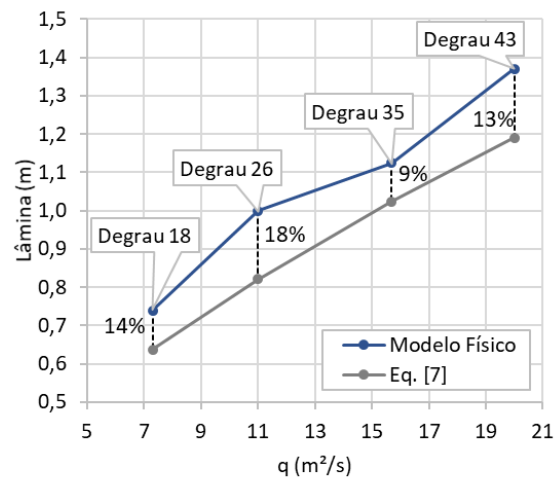


Figura 14 – Comparação entre resultados do modelo físico e da equação [7].

Considerando apenas a concentração média de ar no trecho em regime uniforme, o aumento da lâmina, representado pelo fator de correção $FC = 1/(1 - C_m)$, foi avaliado para diversas vazões, e é mostrado pela Figura 15. A taxa de aumento da lâmina por conta da aeração decresce com o aumento da vazão específica, e, para $10 \leq q \leq 20 \text{ m}^2/\text{s}$, o aumento pode ser aproximado como 40% da altura de água lida no modelo físico. Esse valor representa concentração média de ar em torno de 0,30, valor coerente com as análises de Terrier (2016).

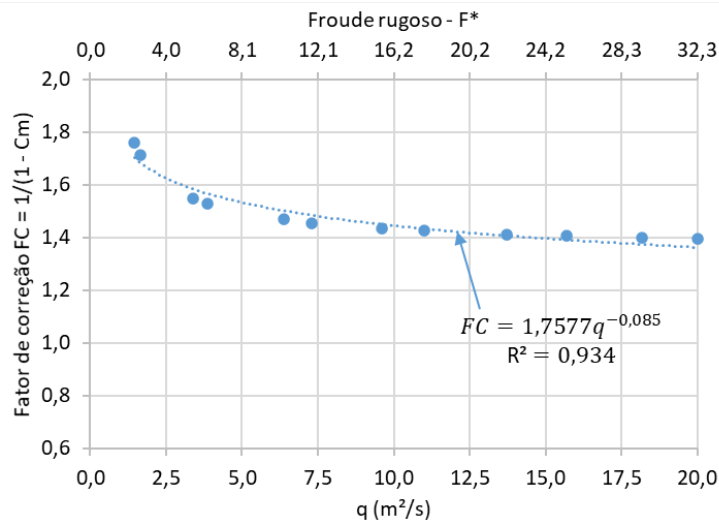


Figura 15 – Fator de correção $1/(1 - C_m)$ em função de q e F_* .

Nessa mesma Figura 15, indica-se curva de tendência válida para as características da calha estudada; essa curva tem sua expressão apresentada na equação [10].

$$FC = 1,7577q^{-0,085} \quad [10]$$

Dessa forma, considerando y_m como a altura de água lida no modelo físico (que a favor da segurança pode ser suposta como não-aerada), a lâmina que deverá ser considerada em protótipo, y_p , pode ser estimada pela equação [11].

$$y_p = FC \cdot y_m \quad [11]$$

O fator FC , é certo, carrega apenas a correção proveniente da aeração do escoamento, sendo que para determinação da altura do muro deverá ser ainda multiplicado pelo devido fator n , como mostrado pela equação [12]. Como já mencionado, a existência de estudos em modelo reduzido permite otimizar n para 1,2.

$$H = n \cdot FC \cdot y_m \quad [12]$$

CONCLUSÃO

Foram analisadas as lâminas de água do modelo físico reduzido e comparadas com metodologia de previsão de aeração do escoamento em calhas em degraus. Na previsão de aeração, foi considerado cenário em que não houvesse modelo físico reduzido. Os resultados do modelo foram também confrontados com as estimativas de Hunt et al. (2013) apud Rosa et al. (2018) para altura de água y , em que os primeiros, para todos os casos, mostraram-se maiores, chegando a atingir a diferença máxima de 13%.

A altura de água no ponto de início de aeração foi também avaliada. Nesse caso, também, o modelo reduzido mostrou resultados acima dos estimados, com diferença de até 18%.

Avaliou-se por fim, o fator de correção associado à aeração do escoamento, onde constatou-se que, para vazões específicas na faixa de $10 \leq q \leq 20 \text{ m}^2/s$, esse fator pode ser aproximado por 1,4.

Além disso, a determinação da altura dos muros laterais exige a consideração de borda livre, que pode ser otimizada quando da existência de resultados de modelo.

Todas essas avaliações reforçaram a importância dos estudos em modelo reduzido para projetos hidráulicos de engenharia, já que confirmaram, na prática, que metodologias empíricas de previsão, mesmo quando adequadas a determinada estrutura, podem sugerir resultados sensivelmente distintos dos do modelo físico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Samarco Mineração, à BVP Geotecnia e Hidrotecnia, ao CTH-USP e à FCTH, por disponibilizarem as informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Boes, R. M.** (2000). Scale effects in modelling two-phase stepped spillway flow. *Hydraulics of stepped spillways*, pp. 53–60, H.-E. Minor, W.H. Hager, eds. Rotterdam, Balkema.
- Boes, R. M. e Hager, W. H.** (2003). Hydraulic Design of Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 129, n. 9, pp. 671-679.
- Chanson, H.** (2009). Turbulent air–water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects. *Environ. Fluid Mech.* 9, 125–142.
- Chanson, H.; Toombes, L.** (2002). Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 29(1): pp. 145-156.
- Heller, V.** (2011). Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*, v. 49, n. 3, pp. 293-306.
- Hunt, S. L. e Kadavy, K. C.** (2013). Inception Point for Embankment Dam Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 139, n. 1, pp. 60-64.
- Hunt, S. L. e Kadavy, K. C.** (2014). Flow depth and energy coefficient relationships for stepped spillways. *5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*, Brisbane, Australia, 25-27 June 2014.
- Matos, J. S. G.** (1999). *Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus*. Dissertação de doutoramento, Instituto Técnico Superior, Portugal.
- Matos, J. S. G. e Quintela, A. C.** (1995). Descarregadores de cheias em degraus. Posição actual da avaliação da dissipação de energia. *XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e II Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*.
- Minor, H.-E.; Hager, W. H.** (2000) Ed. *Hydraulics of Stepped Spillways*. Rotterdam, Balkema.
- Rosa, A. P.; Matos, J. S. G. e Marcelino, J.** (2018). Study of a RCC Spillway for Arroio Dam. *Third International Dam World Conference*, Brasil, Foz do Iguaçu, 17-21 setembro, 2018.
- Terrier, S.** (2016). *Hydraulic performance of stepped spillway aerators and related downstream flow features*. Ph.D. Thesis, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2016.