

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### LOCALIZAÇÃO NUMÉRICA DO PONTO DE ESTAGNAÇÃO EM CANAL ESCALONADO DE BAIXA DECLIVIDADE

*André Luiz Andrade Simões<sup>1</sup>; Thaise Ithana de Souza França<sup>2</sup>; Leonardo de Jesus Pereira<sup>3</sup>;  
Luciano Matos Queiroz<sup>4</sup> & Harry Edmar Schulz<sup>5</sup>.*

**RESUMO** – Os canais com o fundo em degraus são importantes estruturas hidráulicas empregadas como parte de sistemas extravasores de barragens, sistemas de drenagem, canais para transposição de peixes, entre outros usos. Conhecer as características dos possíveis escoamentos em tais estruturas é essencial para elaboração de projetos. Devido ao uso frequente dos vertedouros em degraus, a maior parte dos estudos publicados sobre o tema está atrelada a canais íngremes. Neste trabalho foram estudados numericamente escoamentos em um canal com baixa declividade, empregando o modelo multifásico não homogêneo e o modelo de turbulência  $k-\epsilon$ , com o propósito de calcular a posição do ponto de estagnação sobre cada degrau. Os tipos de escoamento observados como resultados das simulações estão de acordo com as previsões encontradas na literatura, baseadas em estudos experimentais. Equações com variáveis adimensionais foram desenvolvidas para representação dos resultados obtidos. Em todos os casos simulados, a razão entre a posição horizontal do ponto de estagnação e a altura do espelho do degrau resultou superior à unidade, indicando a ocorrência de vórtices assimétricos. Para esta observação, também foram apresentadas relações adimensionais e equações simplificadas. O conhecimento dos detalhes do escoamento nos degraus permite que equações para pressões e dimensionamento possam ser melhor embasadas.

**ABSTRACT** – Stepped chutes are important hydraulic structures used as part of spillways, drainage systems, fish passages, among other uses. The knowledge of the characteristics of possible flows in such structures is essential for their correct design. Due to frequent use of stepped spillways, most published studies on the subject are tied to steep channels. In this work flows were studied numerically in a stepped chute with low slope, using the inhomogeneous multiphase model and the  $k-\epsilon$  turbulence model in order to calculate the position of the stagnation point on each step. The flow regimes observed as results of the simulations are in agreement with the predictions found in the literature, based on experimental studies. Equations using dimensionless variables were developed to better represent the results. In all the simulated cases, the ratio between the horizontal position of the stagnation point and the height of the step was greater than the unity, which indicates that asymmetric vortices occurred. This result is also presented using dimensionless relations and simplified equations. Knowing the details of flows along the steps furnishes better basis for design equations.

**Palavras-Chave** – Canal em degraus. Estruturas hidráulicas. Ponto de estagnação.

1) Escola Politécnica - Universidade Federal da Bahia-UFBA, Rua Prof. Aristides Novis nº 02 Federação, Salvador-Bahia, CEP: 40210-630, andre.simoos@ufba.br.

2) Escola Politécnica - UFBA, Rua Prof. Aristides Novis nº 02 Federação, Salvador-Bahia, CEP: 40210-630, thaiseithana@hotmail.com.

3) Departamento de Engenharia Ambiental - Escola Politécnica - UFBA, Rua Prof. Aristides Novis nº 02 Federação, Salvador-Bahia, CEP: 40210-630, ljpereira.ufba@gmail.com.

4) Escola Politécnica - UFBA, Rua Prof. Aristides Novis nº 02 Federação, Salvador-Bahia, CEP: 40210-630, lmqueiroz@ufba.br.

5) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Av. Trab. São-Carlense, 400 - Centro, São Carlos - SP, 13566-590. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – DEHA, Universidade Federal do Ceará, Bloco 713 - 1.º Andar - Centro de Tecnologia, Fortaleza, CE, 60451-970. heschulz@sc.usp.br.

## INTRODUÇÃO

Escoamentos em canais com fundo em degraus ocorrem em quedas sucessivas com ou sem formação de ressaltos hidráulicos sobre os degraus, em regime de transição ou em regime deslizante sobre turbilhões, sendo este último o principal regime ou tipo de escoamento em sistemas extravasores de barragens, conhecidos como vertedouros em degraus. Os escoamentos em quedas sucessivas, embora menos frequentes, também ocorrem em sistemas extravasores de barragens. Esse regime é comum em canais empregados para drenagem de taludes, em canais de macrodrenagem, em canais de estações de tratamento de esgoto, em canais para transposição de peixes, estruturas ornamentais e em escadarias drenantes. Desde o trabalho de Rand (1955), relativo ao escoamento sobre um degrau, poucos estudos foram conduzidos sobre o escoamento em queda sucessivas, quando comparado a quantidade de trabalhos que versam sobre o regime deslizante sobre turbilhões. O mesmo pode ser dito sobre os demais regimes em canais com baixa declividade. Essery e Horner (1978) realizaram experimentos em canais em degraus com pisos horizontais e em aclave, tendo identificado limites para ocorrência dos regimes de escoamento quedas sucessivas e deslizante sobre turbilhões. Rajaratnam (1990) analisou os dados de Essery e Horner (1978) para pisos horizontais e concluiu que o escoamento deslizante sobre turbilhões ocorre para  $h_c/s \geq 0,8$ , para  $0,4 \leq s/l \leq 0,9$ , em que  $h_c$  = altura crítica,  $s$  = altura do degrau e  $l$  = comprimento do piso do degrau. Rajaratnam (1990) também analisou os dados de Sorensen (1985), tendo observado que o escoamento em quedas sucessivas só ocorreu para  $h_c/s \leq 0,16$ , contrariando o esperado naquela ocasião, que seria para  $h_c/s < 0,8$ . Essa foi, provavelmente, a primeira indicação de ocorrência do regime de transição. Mais tarde outros autores empregaram técnicas experimentais, analíticas e numéricas para determinação de critérios de ocorrência do regime em quedas sucessivas, a exemplo de Chanson (1994), Chamani e Rajaratnam (1999), Yasuda e Ohtsu (1999), Chanson (2001), Ohtsu *et al.* (2001), Chinnarasri e Wongwises (2004) e Arantes (2007).

Chanson (2002) classificou o escoamento em quedas sucessivas em três sub-tipos, a saber: escoamento com ressalto hidráulico sobre os pisos dos degraus; escoamento com formação parcial de ressaltos hidráulicos sobre os pisos e escoamento sem formação de ressalto hidráulico. Ohtsu e Yasuda (1997) descreveram pela primeira vez a existência de um regime de transição entre os regimes quedas sucessivas e deslizantes sobre turbilhões. O escoamento deslizante sobre turbilhões ocorre com maior frequência em vertedouros em degraus, mas também é observado em canais de baixa declividade. Segundo Chanson (2002), há três padrões para esse regime de escoamento: (1) Em canais íngremes, são formados vórtices que preenchem completamente a cavidade entre degraus; (2) em canais com declividades menores, Chanson (2002) indica a ocorrência de esteiras que se originam nas extremidades dos degraus e terminam no início da próxima esteira; (3) para

canais declividades ainda menores (com ângulos entre o pseudo fundo e a horizontal,  $\alpha$ , inferiores a  $12^\circ$  a  $15^\circ$ , sendo o pseudo fundo formado pela linha imaginária que liga as extremidades dos degraus), a esteira originada na esquina de um degrau tem a sua extremidade final sobre o piso do próximo degrau e não provoca interferência na próxima esteira. Ohtsu *et al.* (2004) estudaram experimentalmente canais com  $5,7^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$ . Para  $5,7^\circ \leq \alpha \leq 19^\circ$ , os referidos autores observaram que a superfície livre não é sempre paralela ao pseudo fundo, só ocorrendo tal paralelismo para  $s/h_c$  muito pequeno. Eles observaram que, para  $19^\circ < \alpha \leq 55^\circ$ , a superfície livre é aproximadamente paralela ao pseudo fundo.

Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos numericamente para um domínio computacional geometricamente semelhante a um canal em degraus com  $s/l = 0,25$  ( $\alpha = 14,04^\circ$ ),  $s = 0,30$  m e para  $0,4 \leq s/h_c \leq 1,5$ . O objetivo é apresentar a localização adimensionalizada do ponto de estagnação em relação ao espelho do degrau imediatamente a montante do mesmo. No ponto de estagnação ocorre a pressão máxima sobre o piso do degrau, grandeza de interesse para o dimensionamento da estrutura. O ponto de estagnação também é relevante por separar o escoamento vorticoso daquele que segue para jusante. Neste caso, sabe-se que os vórtices formados entre degraus são responsáveis por grande parte da energia dissipada. Além disso, os vórtices estabelecem uma “zona morta” capaz de separar fases líquida e sólida, conforme estudo de Oliveira *et al.* (2018).

## METODOLOGIA

As equações de conservação de massa e a segunda lei de Newton combinada à lei constitutiva para fluidos newtonianos, *i.e.*, a equação de Navier-Stokes, formam um sistema com quatro equações e quatro incógnitas considerado capaz de representar escoamentos laminares, de transição à turbulência e turbulentos. Escoamentos turbulentos, entretanto, só podem ser estudados para baixos números de Reynolds e com elevado custo computacional, sendo impraticáveis, atualmente, para solução imediata de problema de engenharia. Por esse motivo, as referidas equações são empregadas com grandezas médias, sendo denominadas como equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds. Esse uso requer o emprego de algum modelo para a turbulência, dentre os quais foi escolhido, para este trabalho, o modelo k- $\epsilon$ , tendo como referência para tal escolha a comparação realizada por Simões *et al.* (2011).

O escoamento em superfície livre pode ser modelado com diferentes estratégias. Neste trabalho adotou-se o modelo multifásico não homogêneo, cuja característica principal é o compartilhamento apenas do campo de pressões entre as fases (gás-líquido, que aqui é ar e água), conforme descrito em CFX (2004). O domínio computacional, semelhante ao ilustrado na Figura 1,

é bidimensional e representa um canal em degraus com  $s = 0,30$  m,  $l = 1,20$  m,  $s/l = 0,25$ . A condição de contorno à entrada foi imposta com a velocidade crítica e altura crítica. O topo do domínio é considerado aberto para o escoamento de ar, apenas. A extremidade de jusante do canal é aberta para água e ar, condição imposta com derivadas nulas e adequada para saídas com escoamentos supercríticos. O uso da simetria nas laterais do domínio e de uma malha com elementos cujas dimensões não sejam menores que a largura do domínio garante a característica bidimensional adotada. Os pisos e espelhos dos degraus são contornos sólidos tratados com lei de parede e rugosidade absoluta equivalente igual a 1 mm. As malhas adotadas são estruturadas e com número de nós entre 101.154 e 163.134. As simulações foram realizadas em regime permanente e com o uso do solver do software CFX, empregando os esquemas numéricos de alta resolução para os termos advectivos e para turbulência.

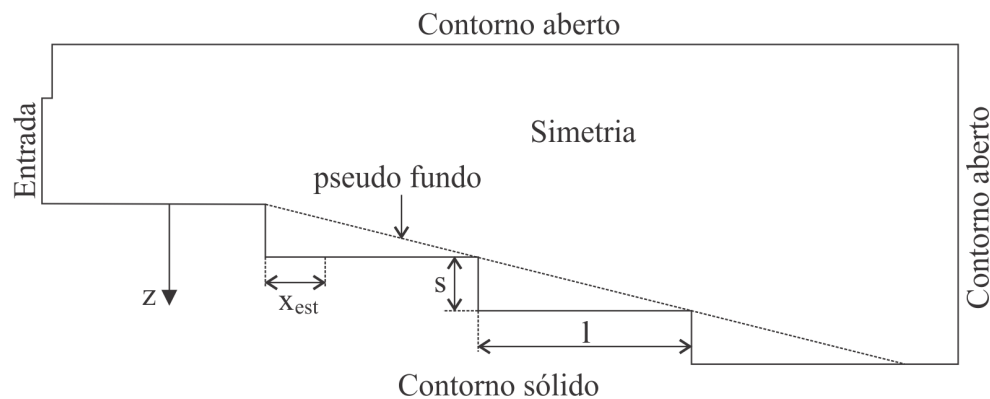


Figura 1 – Domínio computacional, condições de contorno e definições.

A localização do ponto de estagnação sobre cada degrau foi feita a partir do campo de velocidades e representada com a grandeza  $x_{est}$  indicada na Figura 1. Uma análise dimensional para o problema aqui abordado levou à definição dos seguintes adimensionais:  $x_{est}/h_c$ ,  $z/h_c$  (em que  $z =$  eixo vertical, positivo para baixo e com origem no primeiro patamar, como na Figura 1) e  $s/h_c$ . As simulações realizadas correspondem a  $0,4 \leq s/h_c \leq 1,5$ .

## RESULTADOS

Os padrões calculados foram identificados com o uso do campo de fração volumétrica de água, como ilustrado na Figura 2. Em todos os casos, não foram empregados aeradores de fundo e as cavidades abaixo do pseudo fundo permaneceram plenamente preenchidas com água. Os pontos formados por  $(s/l, s/h_c)$  foram inseridos na Figura 3, adaptada de Simões *et al.* (2011), que reúne resultados experimentais dos autores citados em sua legenda. As Figuras 2a-d representam padrões de escoamentos em quedas sucessivas sem formação de ressalto hidráulico, padrões identificados pela presença de um trecho de escoamento com superfície livre paralela ao piso do degrau. Essas

figuras correspondem a  $1,2 \leq s/h_c \leq 1,5$  e os pontos formados entre esses valores e  $s/l$ , inseridos na Figura 3, mostram que há concordância com a metodologia de Ohtsu *et al.* (2001). As Figuras 2e-f ( $1,0 \leq s/h_c \leq 1,1$ ), quando analisadas, revelaram que tal paralelismo deixa de existir, indicando uma condição de transição ao regime deslizante sobre turbilhões. As superfícies livres para  $0,6 \leq s/h_c \leq 0,9$  (Figuras 2g-j) apresentam influência da forma de fundo, com padrão ondulado característico do regime deslizante do tipo B definido por Ohtsu *et al.* (2004). O escoamento deslizante sobre turbilhões com superfície livre paralela ao pseudo fundo, tipo A segundo os mesmos autores, foi observado nas simulações cujos resultados estão nas Figuras 2k-l ( $0,4 \leq s/h_c \leq 0,5$ ).

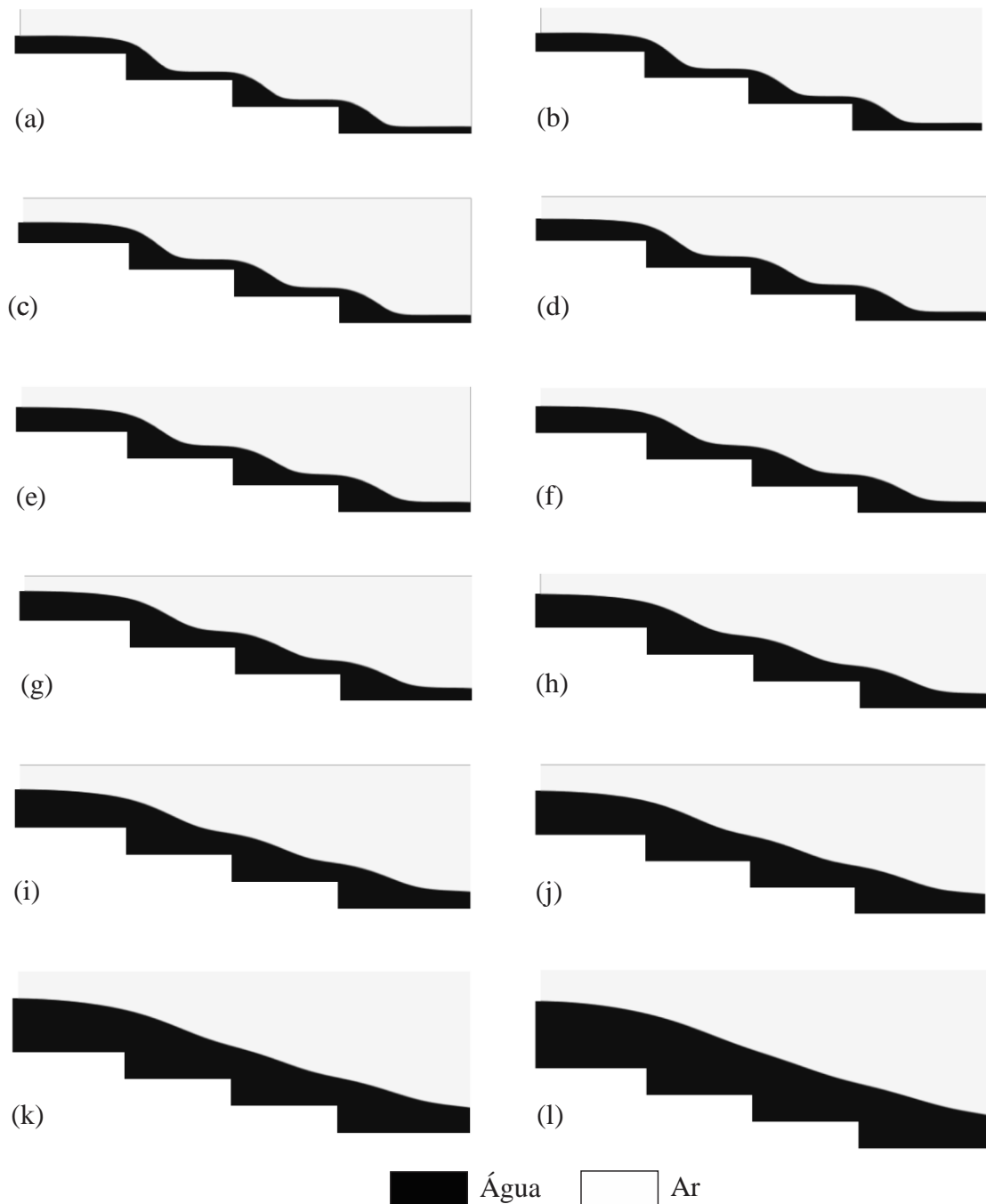


Figura 2 – Campo com as frações volumétricas de água e ar: padrões de escoamento.

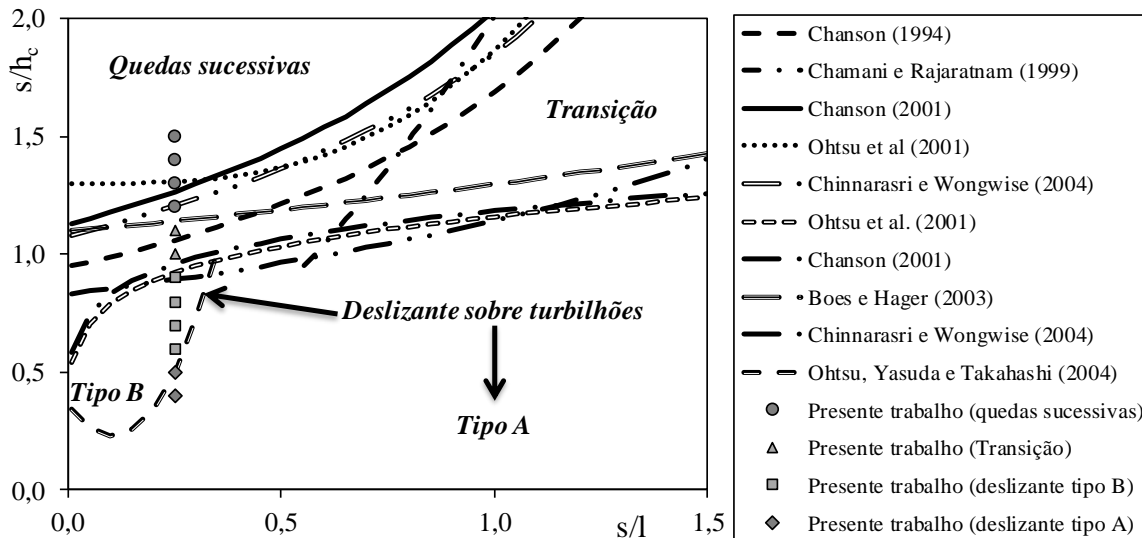


Figura 3 – Definição dos três tipos de escoamento segundo diversos autores e comparação com os resultados numéricos.

Fonte: Adaptado de Simões *et al.* (2011).

Ao relacionar o adimensional  $x_{est}/h_c$  com  $z/h_c$ , foi possível identificar um comportamento logarítmico dependente do degrau sobre o qual ocorre o ponto de estagnação, sendo o primeiro degrau aquele com piso em  $z = s$ . As equações 1, 2 e 3 foram obtidas a partir dos resultados numéricos apresentados na Figura 4a, com  $R^2 = 0,97, 0,98$  e  $0,99$ , respectivamente. A comparação entre os valores numéricos originais e os ajustados com as equações de interpolação 1, 2 e 3 pode ser vista na Figura 4b, em comparação à reta com coeficiente angular unitário, indicando excelente concordância.

$$x_{est} / h_c = 0,717 \ln(z/h_c) + 1,771 \quad (1^\circ \text{ degrau}) \quad (1)$$

$$x_{est} / h_c = 1,128 \ln(z/h_c) + 1,228 \quad (2^\circ \text{ degrau}) \quad (2)$$

$$x_{est} / h_c = 1,09 \ln(z/h_c) + 0,833 \quad (3^\circ \text{ degrau}) \quad (3)$$

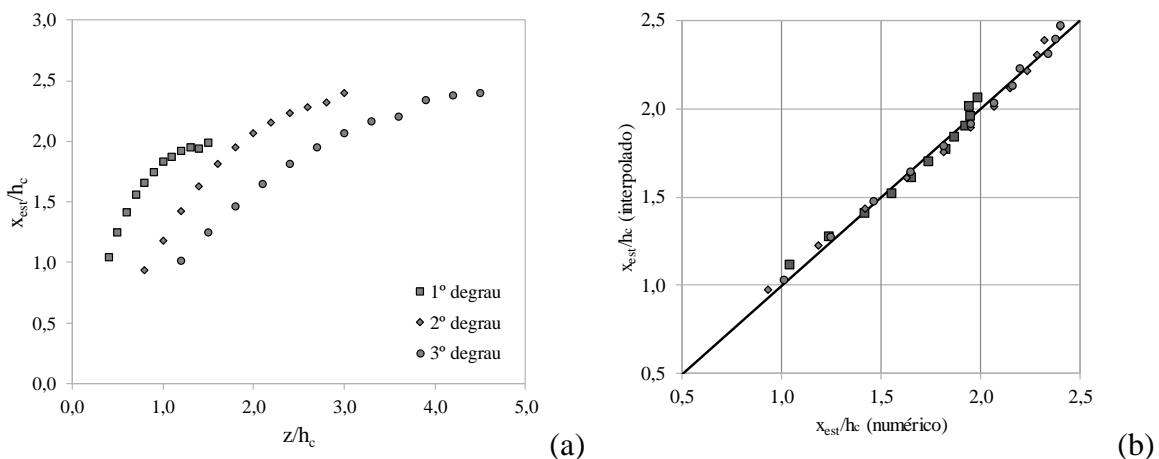


Figura 4 – Posição adimensionalizada do ponto de estagnação.



O adimensional  $x_{est}/s$  em função de  $z/h_c$  também indicou existir um comportamento dependente do degrau considerado, com pode ser visto na Figura 5a. Os valores de  $x_{est}/s$  resultaram maiores que a unidade, indicando alongamentos dos vórtices confinados entre pisos e espelhos, com máximo igual a 2,6, como ilustrado na Figura 5b, que corresponde ao primeiro degrau e a  $s/h_c = 0,4$ . Há um comportamento de tendência bastante linear entre  $x_{est}/s$  e  $z/h_c$ , para os degraus 1 e 3 e para uma parte dos resultados obtidos sobre o degrau 2, como evidenciado na Figura 5a. As equações 4 e 5, com  $R^2 = 0,99$ , foram ajustadas aos pontos dos degraus 1 e 3.

$$x_{est}/s = -1,20z/h_c + 3,06 \quad (1^\circ \text{ degrau}) \quad (4)$$

$$x_{est}/s = -0,297z/h_c + 2,95 \quad (3^\circ \text{ degrau}) \quad (5)$$

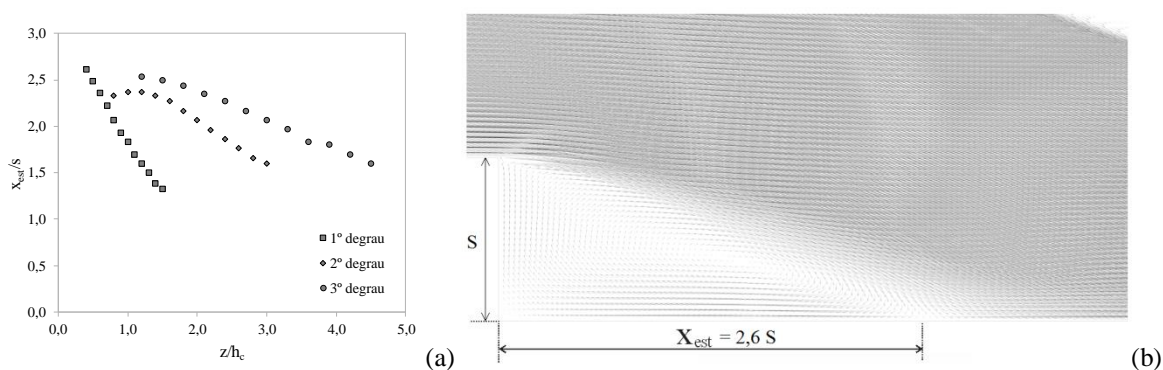


Figura 5 – Posição adimensionalizada do ponto de estagnação, em relação a altura do degrau (a); vórtice sobre o primeiro degrau, para  $s/h_c = 0,4$ .

## CONCLUSÕES

Simulações numéricas foram realizadas em um domínio bidimensional de um canal em degraus de baixa declividade. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que o uso do modelo multifásico não homogêneo em conjunto com o modelo de turbulência  $k-\epsilon$  levou a soluções cujos padrões se assemelham aos observados experimentalmente, quando comparados aos dados encontrados na literatura. A localização do ponto de estagnação adimensionalizado com a profundidade crítica pode ser relacionada com a posição vertical adimensional através de uma função logarítmica e dependente do degrau considerado. A análise da posição do ponto de estagnação adimensionalizada com a altura do degrau demonstrou que a zona vorticiosa do escoamento é assimétrica e com extensão maior que a altura do degrau. Este adimensional apresentou relação linear com a posição vertical adimensionalizada para o primeiro e terceiro degraus, sendo inversamente proporcional à mesma.

## REFERÊNCIAS

- ARANTES, E. J. (2007). Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD. 206 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- BOES, R. M.; HAGER, W. H. (2003). "Hydraulic design of stepped spillways". ASCE, Journal of Hydraulic Engineering. v.129, n.9, p.671-679, Sep., 2003.
- CFX (2004). CFX Solver Theory. Ansys Canada Ltda. Waterloo, Ontario, 250p.
- CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N. (1999). "Onset of skimming flow on stepped spillways". ASCE, Journal of Hydraulic Engineering. v.125, n.9, p.969-971, Sept, 1999.
- CHANSON, H. (1994). "Hydraulics of nappe flow regime above stepped chutes and spillways". Journal of Hydraulic Research, v.32, n.3, p.445-460, Jan., 1994.
- CHANSON, H. (2001). "Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipation". Dam Engineering, v.11, n.4, p.205-242, 2001.
- CHANSON, H. (2002). "The hydraulics of stepped chutes and spillways". The Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 2002. 384 p.
- ESSERY, I.T.S.; HORNER, M.W. (1978). "The hydraulic design of stepped spillways". 2a ed London: Construction Industry Research and Information Association, 1978. 45p. (Ciria Report 33)
- OHTSU, I.; YASUDA, Y. (1997). "Characteristics of flow conditions on stepped channels". In: BIENNIAL CONGRESS, 27, San Francisco, Anais... San Francisco: IAHR, 1997, p. 583-588.
- OHTSU I., YASUDA Y., TAKAHASHI, M. (2001). "Onset of skimming flow on stepped spillways" – Discussion. Journal of Hydraulic Engineering. v. 127, p. 522-524, 2001. Discussão de: CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N. Onset of skimming flow on stepped spillways. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering. v. 125, n.9, p.969-971, Sept, 1999.
- OHTSU I., YASUDA Y., TAKAHASHI, M. (2004). "Flows characteristics of skimming flows in stepped channels". ASCE, Journal of Hydraulic Engineering. v.130, n.9, p.860-869, Sept, 2004.
- OLIVEIRA, V. S. G. ; SIMÕES, A.L.A. ; QUEIROZ, L. M. "Transporte de sedimentos em canais com o fundo em degraus: mecanismos e proposição de estruturas desarenadoras". In: V COBESA, 2018, Juazeiro. V COBESA, 2018.
- RAJARATNAM, N. (1990). "Skimming flow in stepped spillways". Journal of Hydraulic Engineering, v.116, n.4, p. 587-591, April, 1990.
- RAND, W. (1955). "Flow geometry at straight drop spillways". Journal of the Hydraulics Division, Proceedings, ASCE, v. 81, n°791, Sept., p. 1-13, 1955.
- SIMÕES, A.L.A.; SCHULZ, H.E.; LOBOSCO, R.J.; PORTO, R.M. (2011). "Stepped spillways: theoretical, experimental and numerical studies", in *Hydrodynamics - Natural Water Bodies*. Org. por Schulz, H.E.; Simões, A.L.A.; Lobosco, R.J., InTech Open Access Publisher, ed.



SORENSEN, R.M. (1985). “*Stepped spillway hydraulic model investigation*”. Journal of Hydraulic Engineering, v.111, n.12, p. 1461-1472. Dec. 1985.

YASUDA, Y.; OHTSU, I. (1999). Flow resistance of skimming flows in stepped channels. Proc., 28th IAHR Congr., International Association for Hydraulic Research, Delft, The Netherland, Session B14 (CD-Rom), 1999.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal da Bahia pela bolsa de Iniciação Científica PIBIC/UFBA-UFBA do terceiro autor.