

# Proposição de uma escadaria com drenagem associada: estudo numérico via dinâmica dos fluidos computacional

*Proposal of a draining staircase: numerical study using computational fluid dynamics*

• **Data de entrada:**  
15/07/2021


• **Data de aprovação:**  
20/12/2021


Lafis Machado Lima<sup>1</sup> | André Luiz Andrade Simões<sup>1\*</sup> | Luciano Matos Queiroz<sup>1</sup> | Lafayette Dantas da Luz<sup>1</sup> | Harry Edmar Schulz<sup>2</sup> | Rodrigo de Melo Porto<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.005>


## ORCID ID


Lima LM  <https://orcid.org/0000-0003-0635-6246>

Simões ALA  <https://orcid.org/0000-0001-7784-3290>

Queiroz LM  <https://orcid.org/0000-0001-8390-1274>

Luz LD  <https://orcid.org/0000-0002-9080-0612>

Schulz HE  <https://orcid.org/0000-0002-2827-0112>

Porto RM  <https://orcid.org/0000-0003-4862-1810>

## Resumo

Propõe-se um novo modelo de escadaria drenante para solucionar problemas existentes em algumas escadarias convencionais. As equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds, conservação de massa e o modelo de turbulência k-ε foram utilizadas para simular o escoamento na escadaria. Os tipos de escoamentos, a energia dissipada e o fator de resistência apresentaram aderência a dados experimentais da literatura. O padrão de escoamento estabelecido na escada indica haver baixo risco de queda de pessoas. Alturas máximas de escoamento foram calculadas, possibilitando o pré-dimensionamento de muros laterais que evitem o acesso da água às casas. Pressões e forças também foram calculadas. Os resultados obtidos indicam que a escadaria proposta tem elevado potencial de redução do risco de acidentes, além de evitar a invasão das habitações vizinhas pelas águas vindas de versões precedentes dessas escadas e os colapsos estruturais devidos aos vazamentos nas tubulações instaladas embaixo das escadas.

**Palavras-chave:** Canal em degraus. Drenagem. escadaria drenante.

## Abstract

*In this work, a new drainage staircase model is proposed. The averaged Navier-Stokes equations, mass conservation and the k-ε turbulence model were used to simulate the flow. The results obtained, regarding the type of flow over a staircase, with dissipated energy and with the resistance factor of Darcy-Weisbach, show a good comparison in relation to experimental data available in the literature. The discharges distributed by the longitudinal sections were calculated and, based on this information and flow heights, they evaluate the risk of people falling. Maximum drainage heights were calculated, allowing the pre-project of side walls that prevent access to water in the houses. Pressures and forces were also calculated. The results obtained allow the proposed staircase to have a high potential for reducing the risk of accidents, in addition to solving two of the most serious problems found in the models already built.*

**Keywords:** Drainage. Hydraulics. Stepped chute.

<sup>1</sup> Universidade Federal da Bahia - Salvador - Bahia - Brasil.

<sup>2</sup> Hydro-Engineering Solutions - Auburn - Alabama - Estados Unidos.

<sup>3</sup> Universidade de São Paulo - São Carlos - São Paulo - Brasil.

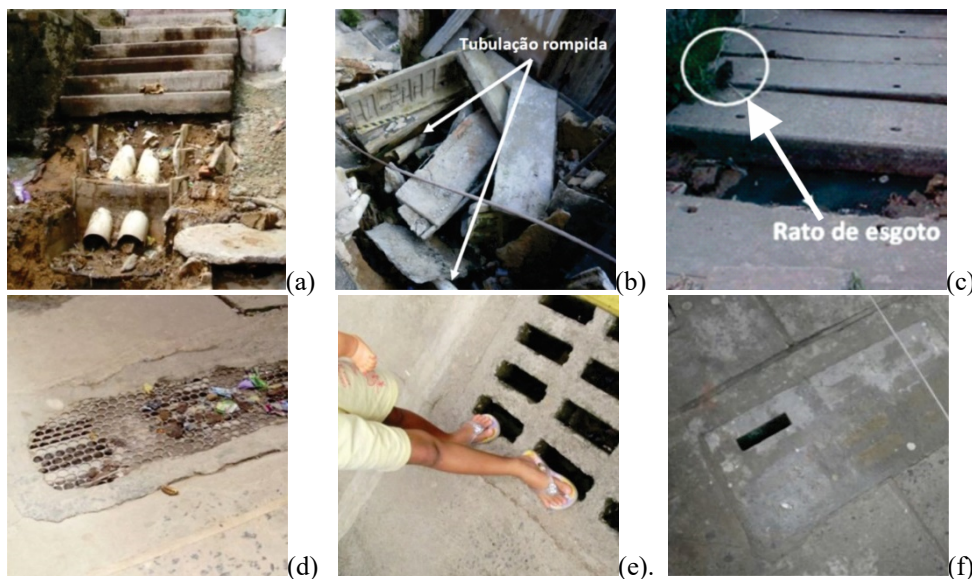
\* **Autor correspondente:** [andre.simoese@ufba.br](mailto:andre.simoese@ufba.br).

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de ocupação dos espaços urbanos brasileiros teve, entre diversas consequências, a construção de bairros localizados em áreas vulneráveis, como em encostas e fundos de vale. O trânsito dos moradores dessas localidades é frequentemente acompanhado de riscos associados aos eventos hidrológicos e às fragilidades estruturais das construções, sendo comum a ocorrência de deslizamentos de terra, condições precárias de drenagem e dificuldade de ir e vir. No ano de 1979, em Salvador, Bahia, concebeu-se um equipamento urbano pioneiro que visava permitir acesso às áreas da cidade com topografia acidentada e realizar a drenagem das águas pluviais. Esse equipamento ficou conhecido como escada drenante, tendo resolvido parcialmente o problema de acesso aos bairros situados em encostas. A escada drenante possui a capacidade de drenar a água do escoamento superficial por meio de uma série de orifícios, reduzindo, desse modo, a vazão sobre os degraus e

possibilitando o uso da escada pelos moradores em períodos chuvosos (VALE, 2009).

Mangieri (2012) demonstrou que, ao longo de 30 anos, a concepção da escadaria drenante foi seguida da proposição de seis modelos diferentes, entre as mais de 370 estruturas existentes na cidade de Salvador, Bahia, com o intuito de resolver problemas de funcionamento. Entretanto, desde a sua criação, registra-se que não foram realizados estudos em modelos reduzidos, simulações numéricas ou proposições de metodologias de dimensionamento capazes de incluir análise estrutural, hidráulica e de condições de locomoção dos transeuntes. O mesmo autor apresenta um conjunto de falhas relacionadas ao funcionamento das escadarias drenantes, dentre as quais, destacam-se: (1) falha estrutural com a ruptura de tubulações subsuperficiais e de trechos da escadaria (Fig. 1a, 1b); (2) falhas ocasionadas por modificações nas estruturas hidráulicas, como o fechamento dos orifícios das grelhas para evitar a passagem de roedores e o acidente com as crianças (Fig. 1c-f).



**Figura 1** - Falhas estruturais em escadarias drenantes em Salvador-BA e outros problemas relacionados.

Fonte: Mangieri (2012).

Escoamentos em canais em degraus podem ocorrer em quedas sucessivas com a formação de

ressaltos hidráulicos sobre os pisos dos degraus, com a formação parcial de ressaltos sobre os pi-

dos degraus ou sem a formação de ressaltos sobre os degraus. Para vazões maiores, considerando a mesma estrutura hidráulica, o escoamento passa a uma condição de transição, com uma superfície livre ondulada e sem a formação de cavidades de ar abaixo de todas as lâminas vertentes. Ainda sobre a mesma geometria, para vazões maiores, todos os degraus passam a ficar plenamente submersos, ocorrendo um escoamento principal sobre escoamentos vorticosos entre os degraus, sendo esse regime denominado como escoamento deslizante sobre turbilhões (HORNER, 1969; SORENSEN, 1985; RAJARATNAM, 1990; DIEZ-CASCON et al., 1991; MATOS & QUINTELA, 1995; OHTSU & YASUDA, 1997). Desde a década de 1980, têm sido conduzidas pesquisas sobre o tema em diversas partes do mundo e, os resultados dessas pesquisas apresentam metodologias e equações que podem ser úteis para a elaboração de projetos de escadarias drenantes, como exposto em Mangieri (2012).

Chen et al. (2002) foram provavelmente os primeiros a publicar resultados de pesquisas sobre vertedores em degraus originadas de estudos numéricos. Eles empregaram o ponto de vista euleriano, modelaram a turbulência com o modelo  $k-\epsilon$  e compararam os resultados com dados experimentais, tendo encontrado boa concordância. Desde então até o presente momento, um número superior a vinte artigos foi publicado, vinculado ao uso do ponto de vista euleriano. Chen et al. (2004) também apresentaram resultados utilizando o modelo  $k-\epsilon$ , mas considerando um domínio tridimensional. Adicionalmente, Tabbara et al. (2005) utilizaram o modelo  $k-\epsilon$  e o método numérico de elementos finitos. Os autores compararam seus resultados numéricos com os experimentais, empregando como parâmetro de comparação a grandeza energia dissipada, e encontraram boa aproximação entre as soluções e a experimentação.

Arantes e Porto (2005) utilizaram o modelo de tensões de Reynolds SSG para a turbulência por meio do software CFX®. Os autores realizaram comparações com dados experimentais publicados na literatura e encontraram boas aproximações entre teoria e experimentação. Dong e Lee (2006), empregando o modelo  $k-\epsilon$  para modelar a turbulência, simularam escoamentos em canais em degraus com ângulos de  $10^\circ$  e  $20^\circ$  em relação à horizontal, destacando-se com isso dos demais estudos, que geralmente simulam escoamentos em canais em degraus ou vertedores de barragens mais íngremes. Ainda em 2006, Xiangju et al. (2006) publicaram um trabalho que foi o resultado de uso do modelo de turbulência RNG  $k-$  aplicado a um domínio com  $1V:0,75H$ , por meio do software Fluent®. De acordo com os resultados dos autores, foi possível simular a mistura bifásica ar-água, sendo este um dos poucos trabalhos que mencionam a obtenção numérica de resultados bifásicos em vertedores em degraus.

Arantes (2007), além de simular o escoamento em um vertedor em degraus convencional, propôs um aerador de fundo situado nas proximidades da crista do vertedor. O autor citado utilizou o software CFX®, modelou a turbulência como o modelo de tensões de Reynolds SSG e utilizou o modelo multifásico homogêneo. No mesmo tema e utilizando o mesmo código computacional, Arantes et al. (2010) simularam um aerador de fundo com jato formado em rampa, o que gera um desnível entre montante e jusante do aerador similar a um degrau. As descargas de ar teóricas para o interior do escoamento foram obtidas por integração do perfil calculado para a concentração de vazios, tendo gerado resultados com a mesma ordem de grandeza dos dados experimentais obtidos no estudo mencionado. Tongkratoke (2008), em seu mestrado, empregou o software Fluent® como o modelo de turbulência *Realizable*  $k-\epsilon$  e simulou o escoamento monofásico em um canal em degraus de baixa declividade.

Qian et al. (2009) testaram quatro modelos de turbulência: (1) *Realizable k- $\epsilon$* ; (2) SST *k- $\omega$* ; (3) *v2-f*; (4) LES (com Smagorinsky-Lilly). Entre as suas conclusões, os autores mencionam que o modelo *Realizable k- $\epsilon$*  foi o que apresentou os melhores resultados. Carvalho e Martins (2009) simularam o escoamento em um canal em degraus não convencional. A geometria do domínio computacional era formada por degraus com soleiras centrais sobre os pisos e soleiras terminais seguidas de um perfil hidrodinâmico. Os autores utilizaram o modelo RNG *k- $\epsilon$*  e realizaram comparações qualitativas do campo de velocidades numérico com fotografias de experimentos em um modelo físico geometricamente semelhante, tendo sido encontrados bons resultados.

Rad e Teimouri (2010) simularam os regimes *nappe flow*, *transition flow* e *skimming flow* com o modelo *k- $\epsilon$* . Esses autores utilizaram degraus com pisos inclinados em algumas de suas simulações. Bombardelli et al. (2010), por meio do software *Flow-3D*, empregaram o modelo RNG *k- $\epsilon$*  e simularam o escoamento em vertedores em degraus, tendo comparado os resultados com dados experimentais para a posição média da superfície livre, constatando bons resultados entre as soluções numéricas e a experimentação. Destaca-se que eles concluíram não haver diferenças significativas entre os modelos de turbulência *k- $\epsilon$*  e RNG *k- $\epsilon$* . Lobosco e Schulz (2010) e Schulz et al. (2011) utilizaram o software livre de dinâmica dos fluidos computacional, *OpenFOAM*<sup>®</sup>. Sarfaraz e Attari (2011) realizaram simulações com o modelo RNG *k- $\epsilon$*  e o software *Flow3D*<sup>®</sup> em um domínio computacional com 1V:1,2H. Simões et al. (2011) apresentaram soluções numéricas para um domínio com 1V:1H (45° em relação à horizontal) obtidas com os modelos de turbulência sem equações diferenciais parciais, o modelo com uma equação, o modelo *k- $\epsilon$* , RNG *k- $\epsilon$*  e SSG (CFX, 2013) por meio do software *CFX*<sup>®</sup>, com o modelo multifásico não homogêneo. Os autores compararam os resultados

com dados experimentais obtidos em um modelo físico semelhante ao domínio computacional, para a posição média da superfície livre não aerada, medida com um sensor ultrassônico. Os resultados apresentados pelos autores mostraram que todos os modelos de turbulência citados fornecem boas aproximações em relação ao experimento, para as condições testadas.

Simões (2012) fez um estudo numérico de escoamentos em vertedores em degraus em regime deslizante sobre turbilhões, em canais com ângulos em relação à horizontal entre 11,3° e 53,13°. O referido autor utilizou o modelo *k- $\epsilon$*  nessas simulações e comparou os resultados com dados experimentais, tendo encontrado boa concordância. Simões (2012) também simulou o escoamento em quedas sucessivas em um canal com 1V:2H e propôs uma formulação simplificada para a previsão do fator de resistência equivalente, seguindo a metodologia de Chanson (2002). Simões et al. (2015) simularam o escoamento em um canal em degraus semelhante a um dos modelos de escadarias drenantes existente. Os autores incluíram um obstáculo sobre um dos degraus com uma forma parecida com a de uma perna com um pé, com o objetivo de calcular a força resultante sobre esse obstáculo. Rodrigues (2018), empregando o a mesma metodologia de Simões (2012) e Simões et al. (2015), simulou o escoamento em uma escadaria com drenagem sob a escadaria através de um tubo, sendo esse modelo semelhante a uma das configurações existentes na classificação feita por Mangieri (2012) e indicada como “tipo 3B”.

Os estudos citados anteriormente adotaram o ponto de vista euleriano para a realização das simulações. A utilização do ponto de vista lagrangeano, que corresponde a acompanhar as diferentes partículas componentes do escoamento, foi iniciada provavelmente em 2011 no que tange à previsão dos escoamentos em vertedores em degraus, com o trabalho de López et

al. (2011), citados por Nóbrega (2018). Nóbrega (2018) também utilizou o ponto de vista de Lagrange e empregou o método *Smoothed Particle Hydrodynamics* – SPH para simular escoamentos em vertedouros em degraus com muros laterais convergentes, em 3D, e em domínios bidimensionais. Nóbrega et al. (2020) descreveram e ampliaram as discussões em torno dos resultados de Nóbrega (2018), para escoamentos em vertedouros lisos e em degraus com o método SPH. Os referidos autores compararam alturas de escoamento numéricas e experimentais e compararam distribuições de velocidades.

## 2 OBJETIVOS

A revisão da literatura e a apresentação do estado da arte expostas nos parágrafos anteriores mostram como têm se desenvolvido os estudos sobre escoamentos em canais com o fundo em degraus. Especificamente sobre os estudos numéricos, nota-se que há poucas aplicações relacionadas aos canais de baixa declividade, assim como apenas alguns trabalhos sobre escadarias drenantes. O presente trabalho teve como objetivo propor um modelo de escadaria com drenagem associada capaz de reduzir a vazão em um de seus trechos, possibilitando a locomoção de pessoas com risco de queda relativamente reduzido quando considerados os modelos convencionais. Tal propositura foi estabelecida a partir da identificação dos problemas ilustrados na Fig. 1 e pretende ser uma alternativa aos atuais modelos de escadarias drenantes que necessitam de grelhas de bocas de lobo e condutos sob a escadaria.

## 3 METODOLOGIA

A partir da análise dos problemas dos modelos existentes de escadarias drenantes foi concebida uma forma alternativa capaz de eliminar tais limitações. A sua descrição inicial foi apresentada em Lima (2019). O modelo alternativo proposto neste trabalho, apresentado na Fig. 2a, é composto por duas vias, uma mais baixa, do lado direito, e uma mais alta, do lado esquerdo (vista de montante para jusante). O lado esquerdo inclui o uso de um degrau mais alto sobre o patamar superior da escadaria, com o objetivo de diminuir ou impedir o escoamento na via mais alta e facilitar a locomoção dos pedestres no momento em que ocorre o escoamento sobre a escada. O lado direito foi concebido para funcionar como canal de drenagem das águas pluviais, convertendo-se em via de acesso de pedestres quando não está operando como canal de drenagem.

As dimensões da escadaria proposta estão de acordo com a NBR 9050/2015 e têm os seguintes valores: comprimento do degrau,  $l = 0,32$  m, altura do degrau,  $s = 0,16$  m, largura do degrau igual a 1,20 m, comprimento do patamar igual a 1,20 m, desnível entre patamares igual a 3,20 m e diâmetro do corrimão igual a 3,0 cm (Fig. 2a-d).

Entende-se que ocupações urbanas já existentes e com condições de declividade particulares em suas encostas podem exigir dimensões distintas. Entretanto isso exige um estudo interdisciplinar das áreas de estruturas, hidráulica e geotecnia (pelo menos), o que vai além do foco do presente estudo. A normatização de procedimentos para essas situações menos amigáveis no contexto normativo da ABNT, contudo, é bem vista pelos autores.



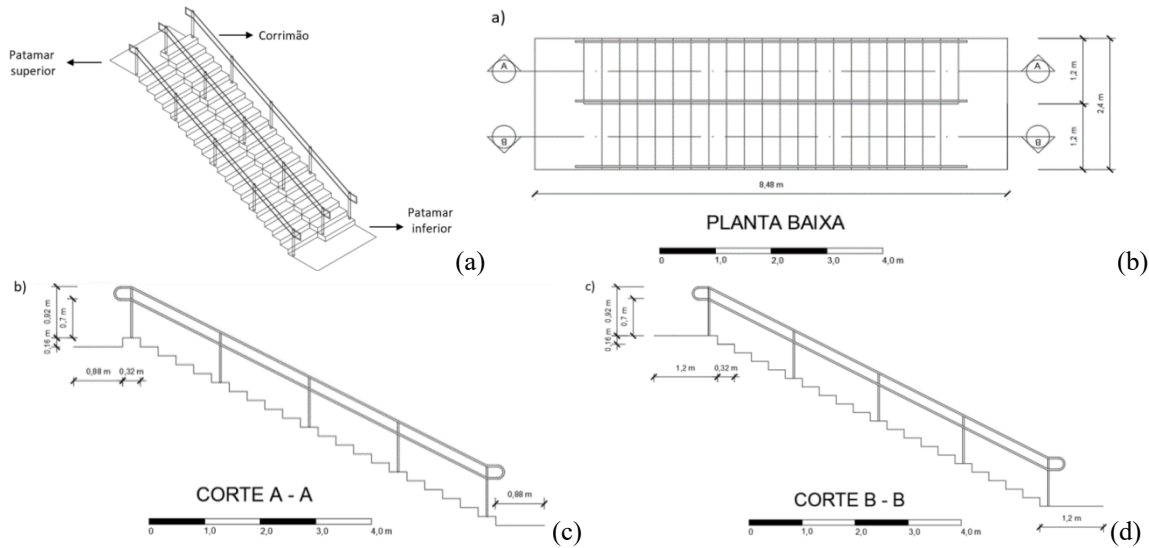


Figura 2 - Modelo geométrico alternativo para a escadaria drenante.

Não há concordância absoluta entre as metodologias propostas ao longo dos anos para a delimitação dos regimes de escoamento, como pode ser visto na Fig. 3. O que existe é uma sobreposição parcial de fronteiras delimitantes, o que sugere transições suaves entre os diferentes tipos de escoamentos, dependentes em um segundo nível de importância de outras variáveis locais, conforme comentado por Simões et al. (2011). Adotando como referência a curva de Boes e Hager (2003), situada aproximadamente entre as demais, para  $s/l = 0,50$  foram escolhidos dois valores de  $s/h_c$  ( $h_c$  = altura crítica) para a realização das simulações. O primeiro,  $s/h_c = 1,12$ , corresponde ao regime deslizante sobre turbilhões. O segundo valor,  $s/h_c = 1,54$ , corresponde ao escoamento em quedas sucessivas, de acordo com todas as metodologias. Com o valor de  $s/h_c$  e da altura do degrau, é possível calcular a altura crítica e, em seguida, a vazão específica,  $q = (gh_c^3)^{1/2}$ .

Para a realização das simulações numéricas foram empregadas as equações de conservação de massa e de Navier-Stokes com médias de Reynolds, escritas sob a forma do modelo multifásico não homogêneo (CFX, 2013). A turbulência

foi modelada com o modelo de duas equações  $k-\epsilon$ . Essa abordagem foi testada por Bombardelli et al. (2010) e Simões et al. (2011), para simulação do escoamento em canais com o fundo em degraus. O domínio computacional, apresentado na Fig. 4, é tridimensional, tem entrada no patamar superior, saída no patamar inferior, contorno sólido modelado com a lei de parede e com rugosidade absoluta equivalente igual a 0,20 mm, semelhante à do concreto (PORTO, 2006) e topo aberto apenas para o ar. Os pilares do corrimão foram considerados como contornos sólidos de parede lisa.

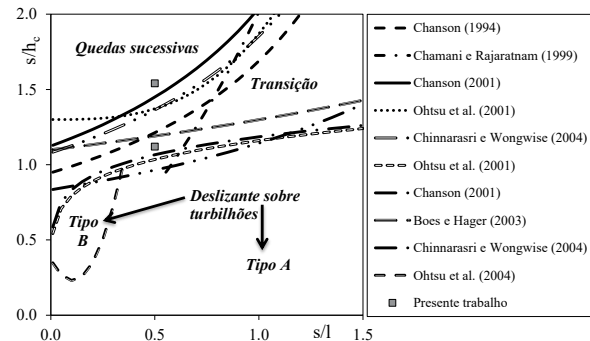
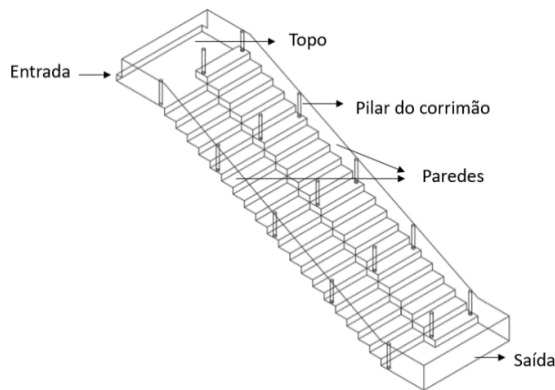


Figura 3 - Regimes de escoamento  
Fonte: adaptado de Simões et al. (2011).



**Figura 4** - Domínio computacional e contornos.

Os cálculos foram realizados em regime permanente, com esquemas numéricos de alta resolução para os termos advectivos. O critério de parada foi estabelecido utilizando um resíduo máximo de  $10^{-5}$ . Empregando a versão acadêmica do software CFX®, foram geradas malhas com 2.106.054 nós e 12.014.433 elementos.

Na etapa de pós-processamento calcularam-se as vazões distribuídas para cada lado da escada a partir da Eq. 1. Foram calculadas as forças resultantes nos pilares do corrimão com a integração das distribuições de pressão (Eq. 2).

$$Q_j = \iint_{A_j} \vec{v} \cdot \vec{n} dA \quad (1)$$

$$F_{pi} = \iint_{A_i} p dA \quad (2)$$

em que,  $Q_j$  é a vazão,  $\vec{v}$  é a velocidade,  $\vec{n}$  é o vetor unitário normal à superfície de controle, e  $j = 1$  a 2 (dois canais em degraus);  $F_{pi}$  é a força resultante na superfície  $i$ , sendo  $i = 1$  a 15 (15 pilares), e  $p$  é a pressão distribuída sobre a área  $A_i$ .

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

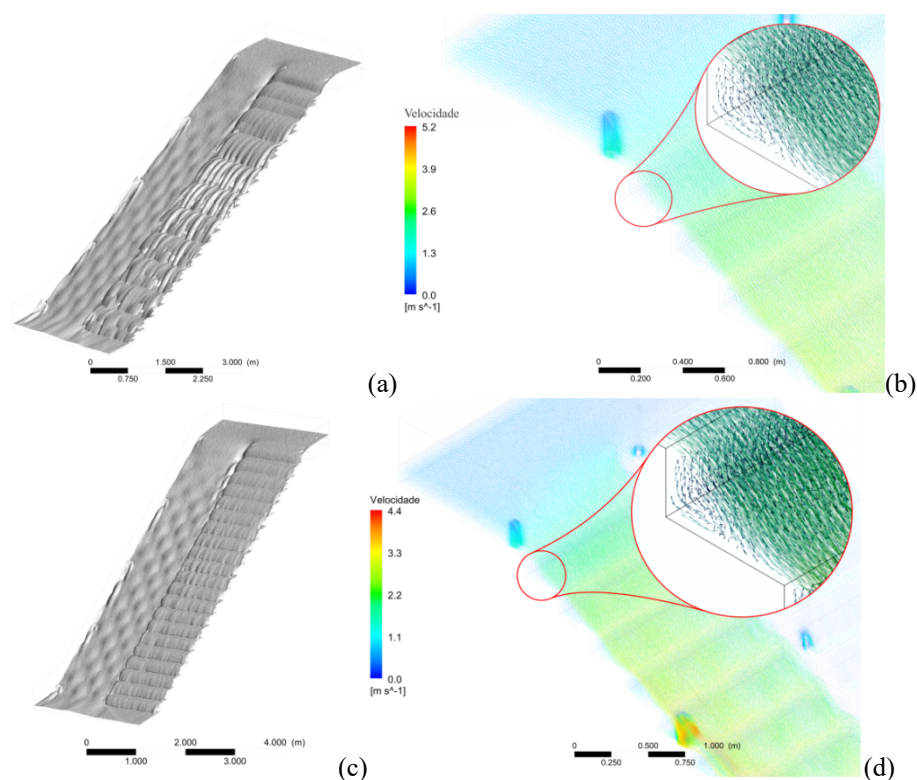
Os resultados numéricos obtidos para a vazão de  $0,408 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $s/h_c = 1,12$ ;  $q = 0,17 \text{ m}^2/\text{s}$ ) mostram que 79% da vazão total de entrada foi escoada pelo lado direito da escada, o que pode ser considerado uma melhoria para as condições de locomoção dos pedestres no lado esquerdo, enquanto o lado direito opera como canal de drenagem com uma vazão mais elevada. Para a segunda simulação, com  $s/h_c = 1,54$ ;  $q = 0,11 \text{ m}^2/\text{s}$ , 87% da vazão total de entrada foi escoada pelo lado direito da escada e 13% pelo lado esquerdo.

A visualização da superfície da água foi efetuada utilizando a iso-superfície para fração volumétrica de ar igual a 0,90 mostrada nas Fig. 5a e 5c, sendo 0,90 o valor geralmente empregado em estudos sobre vertedouros em degraus, como pode ser visto em Chanson (2002). Observou-se o estabelecimento de um padrão irregular dos jatos do escoamento em quedas sucessivas no lado esquerdo da escada, enquanto um escoamento deslizando sobre turbilhões estabeleceu-se no lado direito, este último apresentando uma superfície livre com característica menos irregular. No campo de velocidades do escoamento (Fig. 5b e 5d) podem ser observados grandes vórtices entre os degraus do lado direito da escada, característicos do escoamento deslizando sobre turbilhões. Além disso, na Fig. 5a nota-se que a presença dos pilares do corrimão nas proximidades da parede direita do canal levou à formação de ondas e conseqüente elevação da superfície livre, sendo esse efeito menos significativo para o primeiro pilar, sobre o patamar superior.

A Fig. 5c, correspondente a  $s/h_c = 1,54$ , indica a ocorrência de um escoamento em quedas sucessivas mais bem definido do lado esquerdo da escada, sem os saltos observados para  $s/h_c = 1,12$  (Fig. 5a). O escoamento pelo trecho mais baixo ocorreu como deslizando sobre turbilhões, como pode ser visto na Fig. 5d. Considerando a largura de cada trecho, igual a 1,20 m, e as respectivas

vazões, foram calculados os valores de  $s/h_c$  por trecho e verificadas as soluções numéricas em relação aos métodos experimentais da Fig. 3. Para a primeira simulação, Fig. 5a,b,  $s/h_c = 0,82$ . Esse valor, para  $s/l = 0,5$  corresponde ao regime desli-

zante sobre turbilhões. Para a segunda simulação, Fig. 5c,d, foi calculado o valor de  $s/h_c = 1,07$ . De acordo com a Fig. 3, esse número está entre as diversas curvas, mas também próximo à região de ocorrência do regime deslizando sobre turbilhões.



**Figura 5** - (a)  $s/h_c = 1,12$ : Iso-superfície para fração volumétrica de ar igual a 0,90; (b)  $s/h_c = 1,12$ : campo de velocidades do escoamento com destaque para os vórtices entre degraus. (c)  $s/h_c = 1,54$ : Iso-superfície para fração volumétrica de ar igual a 0,90; (d)  $s/h_c = 1,54$ : campo de velocidades do escoamento com destaque para os vórtices entre degraus.

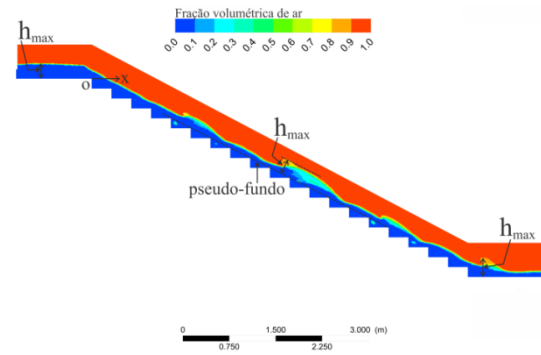
Um dos parâmetros existentes para avaliar o risco de instabilidade de pessoas que tentam manter o equilíbrio quando parcialmente imersas em escoamentos é o produto crítico  $hv_c$  (ABT et al., 1989). Esse produto relaciona a altura de escoamento,  $h$ , e a velocidade do escoamento que geram iminência de instabilidade,  $v_c$ . Embora não sejam conhecidos estudos publicados sobre o produto crítico para canais com o fundo em degraus, sugere-se aqui uma análise aproximada com base em valores da literatura obtidos para canais de fundo plano.

A análise dos resultados da simulação correspondente a  $s/h_c = 1,12$  possibilitou o cálculo do produto  $hV$  máximo do lado direito da escada igual a  $0,27 \text{ m}^2/\text{s}$ , valor próximo ao produto crítico  $hv_c$  encontrado por Russo et al. (2013), que foi igual a  $0,28 \text{ m}^2/\text{s}$ , e superior ao encontrado por Martínez-Gomariz et al. (2016), que foi igual a  $0,22 \text{ m}^2/\text{s}$ , o que aponta para risco elevado de geração de instabilidade para os pedestres no lado direito. Empregando as metodologias de Foster e Cox (1973), Abt et al. (1989), Karvonen et al. (2000), Jonkman e Penning-Rowsell



(2008), Russo et al. (2013) e Martínez-Gomariz et al. (2016), o menor produto crítico calculado foi de  $0,22 \text{ m}^2/\text{s}$ , com a metodologia de Martínez-Gomariz et al. (2016), valor superior ao calculado para o lado esquerdo da escada, igual a  $0,07 \text{ m}^2/\text{s}$ , indicando assim um risco baixo de geração de instabilidade para os pedestres. Esses resultados revelam o elevado potencial de melhoria das condições de locomoção no lado esquerdo da escada e aumento da segurança relativamente às escadas existentes, em cenários de falha dos sistemas de drenagem convencionais.

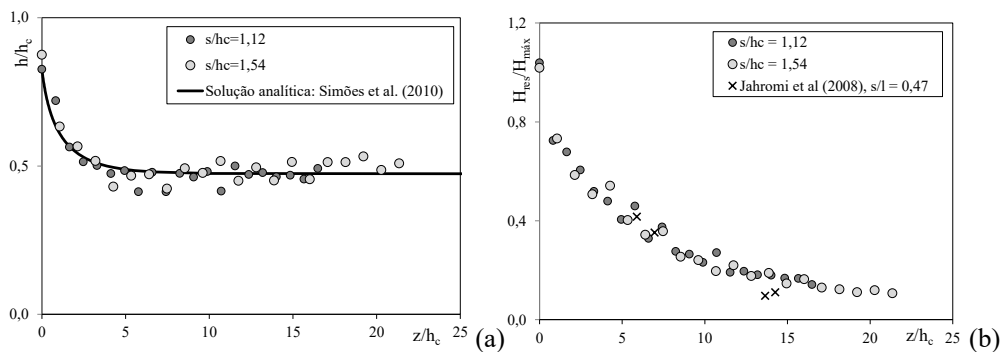
Há interesse em conhecer as profundidades do escoamento ao longo do canal para que seja realizado o projeto dos muros laterais com altura que evite o transbordamento, sobretudo porque as habitações dos moradores locais se situam ao longo das escadarias drenantes. Com a Fig. 6, correspondente à simulação com  $s/h_c = 1,12$ , foi possível determinar as alturas de escoamento que ocorrem junto à parede direita do canal, incluindo as elevações decorrentes da presença dos pilares do corrimão. As alturas máximas, perpendiculares ao pseudo-fundo formado pelo alinhamento dos vértices dos degraus, como indicado na Fig. 6, foram adimensionalizadas em relação à altura crítica. Os valores aqui calculados para o patamar superior e para o canal em degraus foram,  $h_{\max}/h_c = 1,8$ , em  $x/h_c = -0,46$  (patamar superior) e  $x/h_c = 22,2$  (canal); para o escoamento sobre o patamar inferior,  $h_{\max}/h_c = 2,2$ , em  $x/h_c = 44,2$ . Para a parede lateral esquerda, os resultados obtidos foram:  $h_{\max}/h_c = 2,3$  em  $x/h_c = -0,46$  (patamar superior);  $h_{\max}/h_c = 0,62$  em  $x/h_c = 24,4$  (sobre o canal) e  $h_{\max}/h_c = 0,42$  em  $x/h_c = 46,9$  (patamar inferior). Cabe ressaltar que a formação de *spray* e as ejeções de volumes de água são fenômenos que devem ser avaliados experimentalmente, uma vez que as soluções obtidas correspondem a valores médios.



**Figura 6** -  $s/h_c = 1,12$ : distribuição da fração volumétrica de ar junto à parede direita e determinação das alturas máximas,  $h_{\max}$ . O eixo  $x$  é horizontal e tem origem no vértice formado pelo patamar com o primeiro degrau.

A distribuição de fração volumétrica de ar para um plano longitudinal situado no lado direito da escada drenante e em seu centro foi empregada para o cálculo das alturas de escoamento perpendiculares ao pseudo-fundo. Essas alturas de escoamento, em função de  $z/h_c$ , sendo  $z$  um eixo vertical positivo para baixo e com origem no patamar superior, foram utilizadas para calcular a energia residual específica,  $H_{\text{res}}$ , adimensionalizada com a carga hidráulica máxima,  $H_{\text{max}} = z + 1,5h_c$ . Esses valores também foram empregados em conjunto com a solução analítica de Simões et al. (2010), para o cálculo do fator de resistência de Darcy-Weisbach,  $f$ . Como apresentado na Fig. 7a, as alturas de escoamento apresentam um comportamento decrescente no sentido do escoamento, a partir de uma altura um pouco inferior à crítica. Essa distribuição é caracterizada como S2 (PORTO, 2006) e possui solução analítica para canais retangulares, como pode ser visto em Simões et al. (2010). O uso dessa solução analítica possibilitou um ajuste verossímil para  $f = 0,33$ , como apresentado na mesma figura. O fator de resistência de Darcy-Weisbach para canais em degraus apresenta uma significativa variação

quando são analisados os resultados experimentais publicados que compõem a literatura sobre o tema. Chanson (2002) apresentou um histograma com variação de 0,05 a 5,0, com valores mais frequentes iguais a 0,16 e 0,28, sendo  $f = 0,32$  um valor com frequência significativa. Desse modo, o valor obtido, de 0,33, encontra-se próximo aos originados de estudos experimentais, apontando para a adequação do modelo físico-matemático empregado no presente trabalho.



**Figura 7** - Altura de escoamento em função de  $z$ , adimensionalizadas com a altura crítica (a); energia específica residual adimensionalizada como energia específica máxima, em função de  $z/h_c$  (b).

A pressão máxima sobre um dos pisos, decorrente do escoamento, resultou igual a 4,53 kPa, para a simulação com  $s/h_c = 1,12$  e no trecho do lado direito, com a ocorrência do escoamento deslizante sobre turbilhões. Já a pressão mínima, que ocorre na parte superior do espelho do degrau (SIMÕES, 2012), foi de -1,52 kPa. Quanto aos pilares do corrimão, os mais solicitados foram aqueles imersos no escoamento do lado direito. A força resultante máxima calculada com a Eq. 2 foi de 14,8 N. Esses resultados são úteis para o dimensionamento da estrutura, mas devem ser analisados em conjunto com outras solicitações, pois representam apenas os efeitos do escoamento, restando a análise da interação das pessoas com o corrimão, com a escada, a carga relativa ao peso próprio, cargas relativas ao uso de carrinhos empregados para o transporte de

A energia específica residual,  $H_{res} = h + h_c^3/(2h^2)$ , dividida por  $H_{max} = z + 1,5h_c$ , foi comparada com dados de Jahromi et al. (2008), obtidos experimentalmente para  $s/l = 0,47$ , valor próximo ao do presente trabalho,  $s/l = 0,5$ . Como pode ser visto na Fig. 7b, há um comportamento consistente com o esperado para  $H_{res}/H_{max}$  e uma boa aproximação entre os resultados numéricos e os dados experimentais.

materiais diversos ao longo da escada, entre outras possíveis situações.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma escadaria com drenagem associada capaz de eliminar dois dos principais problemas recorrentes em modelos já construídos: a invasão das habitações laterais pelas águas vindas de versões precedentes dessas escadas e os colapsos estruturais devidos aos vazamentos nas tubulações instaladas embaixo das escadas. Foi proposta uma escadaria com um lado rebaixado, ao longo do qual maior parte da água escoava, deixando o lado elevado com uma vazão consideravelmente menor, possibilitando assim o trânsito seguro dos usuários. A metodologia proposta para o dimensionamento e a análise

lise da escadaria se mostrou coerente com dados experimentais disponíveis na literatura para a previsão dos regimes de escoamento. A previsão numérica do produto crítico, destinado a prevenir a estabilidade de pessoas em situações de escoamentos, quando comparada aos métodos baseados em dados experimentais, mostrou que a escadaria proposta tem elevado potencial para a redução do risco de acidentes durante o uso. As simulações numéricas realizadas incluíram os pilares do corrimão no domínio computacional. Os cálculos possibilitaram a determinação das alturas máximas decorrentes da interação entre o escoamento e os obstáculos (os pilares), sendo essa informação útil para o pré-dimensionamento dos muros laterais. Pressões extremas sobre piso e espelho também foram calculadas, sendo estas informações úteis para a análise estrutural. A análise das alturas de escoamento na região central dos escoamentos deslizantes sobre turbilhões levou a mais duas comparações com informações originadas da experimentação: o fator de resistência de Darcy-Weisbach calculado com as soluções numéricas apresentou coerência com dados disponíveis na literatura, assim como a energia específica residual.

## 6 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de iniciação científica da primeira autora, à Pró-Reitoria de Ensino de Pós-Graduação da Universidade Federal da Bahia. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), Nº do Termo do Convênio PIE0021/2016.

## 7 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

## 8 REFERÊNCIAS

- ABT, S. R.; WITTIER, R. J.; TAYLOR, A.; LOVE, D. J. Human stability in a high flood hazard. **Water Resources Bulletin**, v. 25, n. 4, p. 881-890, 1989. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.1989.tb05404.x>.
- ARANTES, E. J. (2007). **Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD**. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- ARANTES, E. J.; PORTO, R. M. (2005). Simulação do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 16, 2005, João Pessoa, **Anais...** Porto Alegre: ABRH: 2005. 18p.
- ARANTES, E. J.; PORTO, R. M.; GULLIVER, J. S.; LIMA, A. C. M.; SCHULZ, H. E. (2009) Lower nape aeration in smooth channels: experimental data and numerical simulation, **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, v. 82, n. 2, p. 521-537, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0001-37652010000200027>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9050: **Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos**. Rio de Janeiro, 2015.
- 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:9\(671\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:9(671)).
- BOMBARDELLI, F.A.; MEIRELES, I.; MATOS, J. (2010). Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways. **Environ. Fluid Mech.**, Vol.11(3), pp.263-288. Publisher: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10652-010-9188-6>.
- CARVALHO, R.F.; MARTINS, R. (2009). Stepped Spillway with Hydraulic Jumps: Application of a Numerical Model to a Scale Model of a Conceptual Prototype. ASCE, **Journal of Hydraulic Engineering**. v.135, No.7, p.615-619, July. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000042](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000042)
- CFX (2013). **ANSYS CFX-Solver Theory Guide**. ANSYS, Inc.
- 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:9\(969\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:9(969)).
- CHANSON, H. (1994). Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. **Journal of Hydraulic Research**, v.32, n.3, p.445-460, Jan., 1994. <https://doi.org/10.1080/00221689409498745>.
- 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. 384 p.
- CHEN, Q.; DAI, G.; LIU, H. (2002). Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.128, n.7, p.683-688, July, 2002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:7\(683\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(683)).
- CHEN, QUN; GUANG-QING, DAI; ZHU, FEN-QING; QING, YANG. (2004). Three-dimensional turbulence numerical simulation of a stepped spillway overflow. **Journal of Hydrodynamics**, Ser. B, 1, 74-79. China Ocean Press, Beijing.
- CHINNARASRI, C.; WONGWISES, S. (2004). Flow regime and energy loss on chutes with upward inclined steps. **Canadian Journal of Civil Engineering**. v.31, p.870-879, Oct., 2004. <https://doi.org/10.1139/I04-052>
- DIEZ-CASCON, J.; BLANCO, J.L.; REVILLA, J.; GARCIA, R. (1991). Studies on the hydraulic behavior of stepped spillways. **Water Power & Dam Construction**, v.43, n.9, p.22-26, Sept..
- DONG, Z.; LEE, J.H.; (2006). Numerical simulation of skimming flow over mild stepped channel. **Journal of Hydrodynamics**. Ser. B, 2006, 18(3): 367-371.
- FOSTER, D.N., COX, R.J. (1973). **Stability of children on roads used as floodways**, Technical Report 73/13, Water Research Laboratory, The University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering.
- HORNER, M.W. (1969). **An analysis of flow on cascades of steps**. 1969. Tese (Doutorado) – Universidade de Birmingham, UK.
- JAHROMI, H.M.; BINA, M.; SALMASI, F. (2008). Physical and numerical modeling of the nappe flow in the stepped spillways. **Journal of Applied Sciences**, 8(9): 1720-1725, 2008. <https://doi.org/10.3923/jas.2008.1720.1725>
- JONKMAN, S.N., PENNING-ROWSELL, E. (2008). Human instability in flood flows, **Journal of the American Water Resources Association**, 44(4), 11 pp. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x>
- KARVONEN, R. A., HEPOJOKI, H. K., HUHTA, H. K., LOUHIO, A. (2000). **The use of physical models in dam-break analysis**. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2000. RESCDAM Final Report.
- LIMA, L.M. (2019). **Avaliação do potencial de uso de modelo geométrico alternativo de escadaria drenante como via de acesso de pedestres e dissipador de energia**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2019.
- LOBOSCO, R.J.; SCHULZ, H.E. (2010). Análise computacional do escoamento em estruturas de vertedouros em degraus. **Mecânica Computacional**, v. XXIX, p. 3593-3600.
- LÓPEZ, D.; BLAS, M. DE; MARIVELA, R.; REBOLLO, J.J.; DÍAZ, R. (2011). Estudio hidrodinámico de vertedores y rápidas escalonadas com modelo numérico tridimensional SPH. Proyecto ALIVES-CA. In: II Jornadas de Ingeniería del Agua: Modelos Numéricos em Dinâmica Fluvial, Outubro, Barcelona, Espanha. **Anais...**
- MANGIERI, L. S. G. **Avaliação dos sistemas de escadarias e rampas drenantes implantadas em assentamentos espontâneos na cidade de Salvador – Bahia**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2012.
- MARTÍNEZ-GOMARIZ, E.; GÓMEZ, M.; RUSSO, B. Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding. **Nat Hazards**, 82, p. 1259-1278, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2242-z>
- MATOS, J. S.G., QUINTELA, A. C. (1995). Flow resistance and energy dissipation in skimming flow over stepped spillways. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER RESOURCES ENGINEERING, 1., 1995, San Antonio, Texas. **Anais...** New York, ASCE, 1995a, v.2, p. 1121-1126.
- NÓBREGA, J. D. **Escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores em degraus de largura constante e convergentes, usando o método Hidrodinâmica Suavizada de Partículas**. 2018. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- NÓBREGA, J.D.; MATOS, J.; SCHULZ, H.E.; CANELAS, R.B. (2020). Smooth and Stepped Spillway Modeling Using the SPH Method. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2020, 146(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001776](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001776)
- OHTSU, I.; YASUDA, Y. (1997). Characteristics of flow conditions on stepped channels. In: BIENNAL 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:6\(519\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:6(519))
- 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:9\(860\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:9(860))
- PORTO, R.M. (2006). **Hidráulica básica**. 4a ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 540p.
- QIAN, ZHONGDONG; HU, XIAOQING; HUAI, WENXIN; AMADOR, ANTÔNIO (2009). Numerical simulation and analysis of water flow over stepped spillways. **Science in China Series E: Technological Sciences**, v.52(7), pp.1958-1965. <https://doi.org/10.1007/s11431-009-0127-z>

- RAD, I.N.; TEIMOURI, M. (2010). An Investigation of Flow Energy Dissipation in Simple Stepped Spillways by Numerical Model. **European Journal of Scientific Research**. Vol.47(4), pp.544-553.
- RAJARATNAM, N. (1990). Skimming flow in stepped spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.116, n.4, p. 587-591, April. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:4\(587\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:4(587))
- RODRIGUES, I.M. (2008). **Simulação numérica de escoamento em escadaria drenante**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2008.
- RUSSO, B.; GÓMEZ, M.; MACCHIONE, F. Pedestrian hazard criteria for flooded urban areas. **Nat Hazards**, v. 69, p. 251-265, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0702-2>
- SARFARAZ, M.; ATTARI, J. (2011). Numerical Simulation of Uniform Flow Region over a Steeply Sloping Stepped Spillway. In: 6th National Congress on Civil Engineering, April 26-27, 2011, Semnan University, Semnan, Iran. **Anais...**
- SCHULZ, H.E.; LOBOSCO, R.J.; SIMÕES, A.L.A. (2011). Multiphase analysis of entrained air in skimming flows along stepped chutes. In: ACOMEN 2011 (5th International Conference on Advanced Computational Methods in Engineering), 2011, Liège. **Anais...** Liège, 2011. v. 1. p. 1-10.
- SIMÕES, A. L. A.; SCHULZ, H. E.; PORTO, R. M. Solução analítica para o perfil da superfície livre em canais retangulares de forte declividade. In: XXIV Congresso Latinoamericano de Hidráulica Punta del Este, Uruguay. 2010. **Anais...**
- SIMÕES, A.L.A.; SCHULZ, H.E.; LOBOSCO, R.J.; PORTO, R.M. (2011). Stepped spillways: theoretical, experimental and numerical studies. In: Schulz, H.E.; Simões, A.L.A.; Lobosco, R.J. **Hydrodynamics - Natural Water Bodies**, ISBN 978-953-307-893-9, InTech Open Access Publisher.
- SIMÕES, A. L. A. (2012). **Escoamentos turbulentos em canais com o fundo em degraus: Resultados experimentais, soluções numéricas e proposições teóricas**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- SIMÕES, A.L.A.; SCHULZ, H. E.; PORTO, R. M.; LUZ, L. D.; MANGIERI, L. S. G.; MATOS, J. E. R.. Contribuição numérica para o estudo de escoamentos em quedas sucessivas e aplicações à drenagem. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015. v. 1. p. 1-8. **Anais...**
- SORENSEN, R.M. (1985). Stepped spillway hydraulic model investigation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.111, n.12, p. 1461-1472. Dec.. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1985\)111:12\(1461\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:12(1461))
- TABBARA, M.; CHATILA, J.; AWWAD, R. (2005). Computational simulation of flow over stepped spillways. **Computers and Structures** **83**, 2215-2224. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.04.005>
- TONGKRATOKE, A. (2008). **Nonlinear turbulence models for multiphase recirculating free-surface flow over stepped spillways**. 238 p, Dissertação (Mestrado em Engenharia), Kasetsart University.
- VALE, M. H. C. **Um projeto urbano com programa político municipal: a experiência do arquiteto João Filgueiras Lima em Salvador na 1ª gestão de Mário Kertész (1979 - 1981)**. 2009. 79 f. Monografia (Especialização em Engenharia Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: 2009.
- XIANGJU, CHENG; YONGCAN, CHEN; LIN, LUO. (2006). Numerical simulation of airwater two-phase flow over stepped spillways. **Science in China Series E: Technological Sciences**, Vol.49, No.6, 674-684. <https://doi.org/10.1007/s10288-006-2029-2>