

## **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTO EM ESCADARIA DRENANTE: VAZÕES E HIDRODINÂMICA DE UM CASO REAL**

*Pedro Rocha Farias<sup>1</sup>; Daniel Castro Hora Fontes<sup>1</sup>; Juliane Grasiela de Carvalho Gomes<sup>1</sup>; Leandro do Rozário Teixeira<sup>2</sup>; Luís Gustavo Macêdo West<sup>1</sup>; Harry Edmar Schulz<sup>3</sup>; Rodrigo de Melo Porto<sup>4</sup>; Iuri Muniz Pepe<sup>2</sup>; Andrea Sousa Fontes<sup>1</sup>; André Luiz Andrade Simões<sup>1</sup>*

**RESUMO** – Escadarias drenantes implantadas em áreas urbanas de encosta desempenham simultaneamente funções de circulação de pedestres e condução do escoamento superficial, ficando sujeitas a condições hidrodinâmicas variadas durante eventos de precipitação. Este trabalho tem como objetivo analisar, por meio de simulação numérica tridimensional, o escoamento em um trecho de escadaria localizado no bairro Bom Juá, em Salvador, Bahia, considerando uma geometria real com mudança de direção em planta. As vazões de entrada foram determinadas a partir de modelagem hidrológica baseada em modelo digital de terreno, empregando-se um evento de precipitação registrado em março de 2011 e hietogramas simulados com períodos de retorno de 2 e 5 anos, a fim de avaliar a influência dessas abordagens nos resultados hidrodinâmicos. As vazões de pico obtidas a partir do evento registrado e dos hietogramas simulados apresentaram valores próximos, indicando consistência entre as diferentes formas de definição empregadas. Para todos os períodos de retorno adotados, a escadaria apresentou um padrão de escoamento deslizante sobre turbilhões ao longo dos degraus. Observou-se também a formação de ondulações na superfície livre na região de mudança de direção do escoamento. Os resultados evidenciam a importância da definição hidrológica adequada das condições de entrada e da consideração de geometrias reais na análise hidráulica de escadarias drenantes.

**Palavras-Chave** – Escadaria drenante; escoamento em degraus; CFD.

**ABSTRACT**– Drainage stairways in steep urban areas often function both as pedestrian routes and as conveyance structures for surface runoff, which exposes them to complex free-surface flow during rainfall events. This study investigates the flow along a reach of a drainage stairway in Bom Juá, Salvador, Brazil, using three-dimensional numerical simulation. The computational domain was built from the actual stairway geometry, including a bend in plan that changes the flow direction. Inflow conditions were derived from hydrological modelling based on a high-resolution digital terrain model. A rainfall event recorded in March 2011 and two IDF-based synthetic hyetographs with 2- and 5-year return periods were considered. The resulting peak discharges were used as inlet conditions in the CFD model. The peak flows obtained from the observed and simulated rainfall scenarios were of comparable magnitude, indicating consistency among the adopted hydrological inputs. For all return periods, the simulations indicated skimming flow along the steps, with free-surface undulations near the bend. The results highlight the need to define hydrological boundary conditions carefully and to represent real geometrical features in hydraulic analyses of drainage stairways.

**Key-words** – drainage staircases; stepped flow; numerical modelling.

1) Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA), Rua Prof. Aristides Novis, 02 - Federação, Salvador - BA, 40210-630, [pedrorochafarias@gmail.com](mailto:pedrorochafarias@gmail.com) (autor para contato)

2) Instituto de Física da UFBA, Rua Barão de Jeremoabo s/n, Campus Universitário de Ondina, Salvador - BA, Brasil CEP: 40170-115

3) Auburn University, 222 Harbert Center, Auburn, Alabama 36849.

4) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400 - Centro, São Carlos - SP, CEP 13566-590.

## INTRODUÇÃO

Escadarias implantadas em áreas urbanas de forte declividade frequentemente acumulam funções de circulação de pedestres e condução do escoamento superficial, especialmente durante eventos de precipitação capazes de produzir escoamento superficial significativo. Nesses eventos o escoamento pode ocupar parcial ou totalmente a superfície dos degraus, comprometendo as condições de uso e introduzindo riscos associados à interação entre o movimento da água e o usuário. Para resolver esse problema, em 1979 e início da década de 1980 foi construída e testada a primeira escadaria drenante na cidade de Salvador, concebida pelo arquiteto João Filgueiras Lima e implantada pela Companhia de Renovação urbana de Salvador - RENURB (Mangieri, 2012).

Embora o comportamento de escoamentos em geometrias com degraus seja amplamente estudado no contexto de sistemas extravasores de barragens, a adaptação desses conhecimentos para escadarias urbanas apresenta limitações, sobretudo quando se consideram geometrias reais, caracterizadas por irregularidades construtivas, variações de declividade e mudanças de direção em planta. Nesse contexto, permanece a necessidade de investigações que considerem geometrias representativas de escadarias reais, permitindo avaliar o comportamento do escoamento sob condições mais próximas daquelas observadas em ambientes urbanos consolidados. Particularmente, a presença de curvas em planta pode introduzir efeitos relevantes, como redistribuição transversal de velocidades, modificação em alturas de escoamento e intensificação de estruturas vorticosas, com implicações diretas sobre as condições de uso pela população urbana.

Diante dessa lacuna, o presente trabalho tem como objetivo analisar, por meio de simulação numérica tridimensional, o escoamento em um trecho de escadaria drenante localizado no bairro Bom Juá, em Salvador - BA, considerando uma geometria que inclui mudanças de direção em planta. Como parte dessa análise, avalia-se a definição das vazões de entrada a partir de modelagem hidrológica baseada em modelo digital de terreno, incluindo o uso de um evento registrado em março de 2011 e dois eventos simulados.

## MATERIAL E MÉTODOS

### *Hidrologia*

A área de estudo está localizada no bairro Bom Juá, em Salvador - BA (Figura 1), com início e término da escadaria nas proximidades da rua Retirolândia. Para a modelagem hidrológica, foi necessário estabelecer hietogramas de entrada do modelo. Dessa forma, foi obtido o hietograma horário referente a um evento ocorrido em março de 2011 e registrado pela Estação Salvador - Ondina (01338007), localizado no bairro de Ondina, considerando a duração de 24 horas e um acumulado de

89 mm. Mais dois hietogramas foram gerados com base na relação de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) da região, com mesma duração e distribuição temporal do evento real para 2 e 5 anos de tempo de retorno. Os valores de TR adotados são compatíveis com recomendações da literatura e de manuais técnicos de drenagem (Collischonn e Dornelles, 2013; ADASA, 2018), incluindo aplicações em microdrenagem.

A relação IDF da região, necessária para a obtenção das chuvas de projeto, foi elaborada com o auxílio da plataforma GAMIDF, sendo utilizados dados de precipitação diária do banco de dados *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BDWG), desenvolvido por Xavier *et al.* (2022), do período de 1º de janeiro de 1990 a 31 de dezembro de 2020. A escolha dos dados da grade em detrimento dos dados provenientes de estações de campo, se deu devido a sua abrangência espacial e extensão da série histórica. A partir do procedimento supracitado, foram obtidos os hietogramas das simulações.

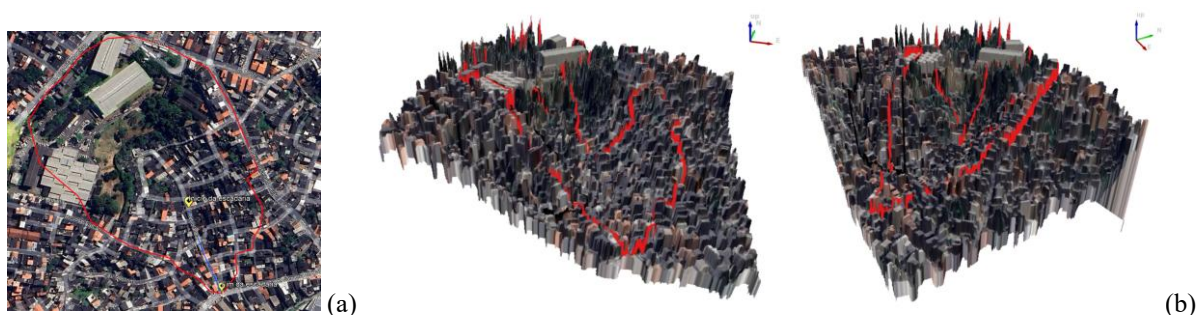


Figura 1 – Localização: (a) imagem de satélite (Google Earth, 26/08/2025); (b) delimitação da bacia (PMS, 2017).

A modelagem hidrológica teve como objetivo estimar as vazões efluentes à escadaria drenante (nos trechos finais da escada) para diferentes cenários de precipitação e tempos de retorno. A partir das simulações, extraíram-se as vazões de pico, posteriormente adotadas como condição de entrada na modelagem via CFD. Para esse fim, utilizou-se o modelo HEC-HMS, desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center do United States Army Corps of Engineers* (USACE, 2023), amplamente empregado na simulação de processos chuva–vazão. A delimitação da bacia de contribuição iniciou-se no módulo de geoprocessamento do próprio modelo, com base em um modelo digital de terreno de 0,5 m de resolução, obtido na plataforma Cartografia Salvador (2021). Em função da complexidade da área urbana, procedeu-se o refinamento manual dessa delimitação por meio da análise do relevo no software QGIS 3.34.7.

Os parâmetros geométricos da bacia (área, declividade média e comprimento do escoamento) derivaram de análise espacial no mesmo ambiente computacional. Para a representação das perdas, adotou-se o método do Curva-Número (CN) do *Soil Conservation Service* (SCS), com valores estimados a partir de base de dados com resolução de 30 m disponibilizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA), considerando condição de umidade antecedente II (AMC II). A

abstração inicial seguiu as formulações do SCS (USACE, 2023), em função do CN. A transformação chuva–vazão utilizou o hidrograma unitário do SCS, tendo como parâmetro de entrada o tempo de atraso, adotado como 0,6 do tempo de concentração da bacia, conforme recomendações do manual do HEC-HMS (USACE, 2023). O tempo de concentração da bacia foi estimado pela equação de Carter, indicada para bacias urbanas (Silveira, 2005; Collischonn e Dornelles, 2013).

### *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica*

O escoamento foi modelado por meio de uma abordagem multifásica não homogênea, considerando as fases água e ar, euleriana-euleriana. Nesse modelo, resolvem-se as equações de conservação de massa e quantidade de movimento para cada fase, com acoplamento por termos de interação interfacial e fechamento pelo compartilhamento do campo de pressão (Ishii e Hibiki, 2011; Ansys, 2021).

As condições de contorno adotadas buscam representar o escoamento no trecho analisado da escadaria, conforme o domínio computacional apresentado na Figura 2. Na entrada, impõe-se velocidade uniforme associada ao cenário hidrológico. Na saída, adota-se condição aberta, compatível com o escoamento supercrítico. As paredes utilizam condição de não deslizamento, com rugosidade de 1 mm, para concreto em condições usuais (Porto, 2006). A superfície superior é uma fronteira aberta à atmosfera (para o ar apenas), de modo a evitar instabilidades numéricas.

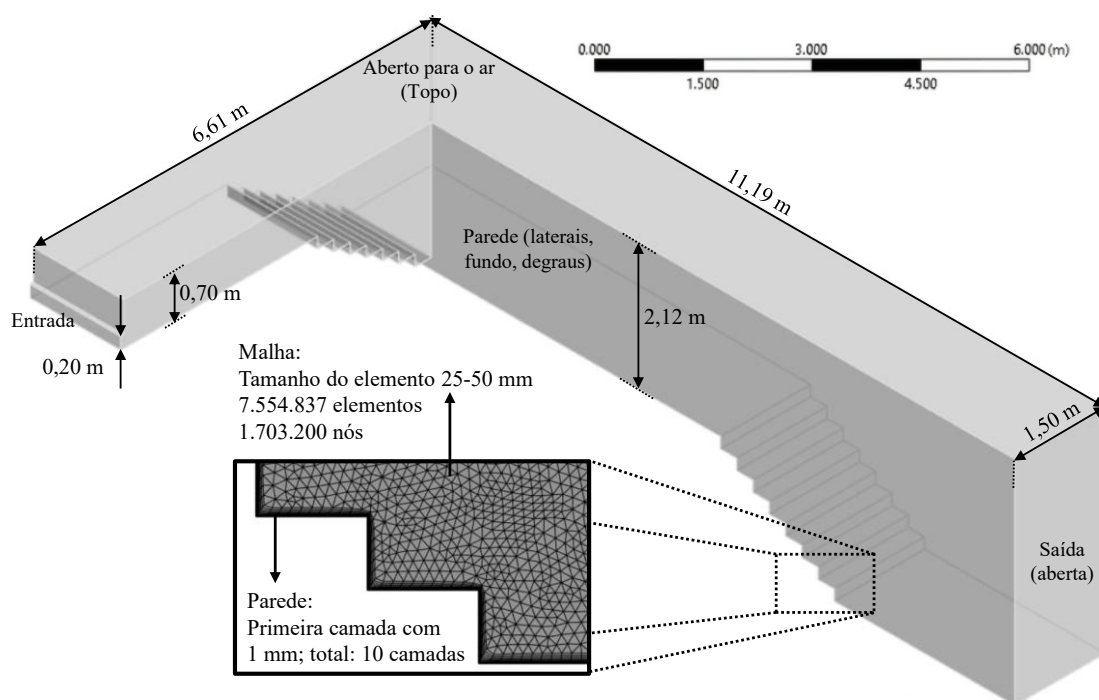


Figura 2 – Domínio computacional, condições de contorno e malha. Degraus com  $s = 17,8$  cm (altura) e  $l = 27$  cm (comprimento). Dimensões estimadas conforme Mangieri (2012) e fotografias do local.

A discretização espacial utilizou malha não estruturada, com refinamento próximo às paredes para aplicação de funções de parede, posicionando o primeiro ponto na região logarítmica da camada limite ( $30 \lesssim y^+ \lesssim 100$ ). A transição entre camadas prismáticas e a malha volumétrica ocorre de forma gradual, evitando descontinuidades e preservando a estabilidade da solução. Testes preliminares de convergência resultaram nas características da malha indicadas na Figura 2.

A turbulência foi modelada com o SST (*Shear Stress Transport*) (Menter, 1994), modelo de duas equações, adequado à representação de escoamentos com separação, recirculação e gradientes de pressão adversos, que combina as vantagens das formulações  $k-\omega$  (Wilcox, 1988) na região próxima à parede e  $k-\epsilon$  (Launder e Spalding, 1974) no escoamento afastado da parede, proporcionando modelagem mais adequada em escoamentos com separação, como aqueles observados em escadas. A convergência foi avaliada para valores RMS dos resíduos menores ou iguais a  $10^{-4}$ , assim como a estabilização da posição da superfície livre.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Hidrologia

Na Tabela 1 e na Figura 3 estão apresentados os resultados da modelagem hidrológica referente aos três cenários simulados.

Tabela 1 – Resumo com os resultados para os cenários elaborados.

| Cenário | TR   | Duração (min) | I (mm/h) | P (mm) | Qp ( $m^3/s$ ) |
|---------|------|---------------|----------|--------|----------------|
| 1       | 2,40 | 1440,00       | 3,70     | 89,00  | 0,52           |
| 2       | 2    | 1440,00       | 3,50     | 84,00  | 0,49           |
| 3       | 5    | 1440,00       | 4,60     | 110,40 | 0,64           |

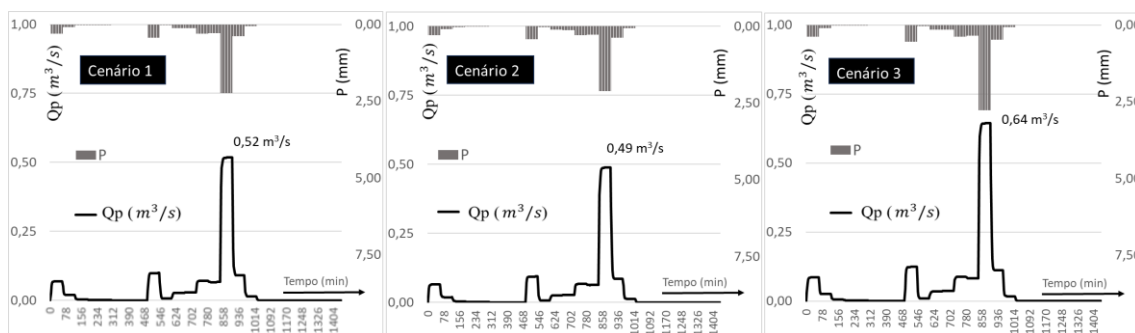


Figura 3 – Hidrogramas para os cenários 1 (evento registrado), 2 (TR de 2 anos) e 3 (TR de 5 anos) resumidos na Tabela 1.

Os resultados da modelagem hidrológica indicam que as vazões de pico associadas aos cenários considerados apresentam variações significativas para uma escala de bacia urbana em função do tempo de retorno dos eventos de precipitação. Conforme apresentado na Tabela 1 e Figura 3, os maiores valores de vazão estão associados aos eventos de maior tempo de retorno, evidenciando respostas com maior volume gerado.

### *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica*

A Figura 4 apresenta o padrão geral do escoamento ao longo da escadaria, com a superfície representada por meio de iso-superfícies de fração volumétrica de ar igual a 0,90, valor usualmente adotado na literatura para definição da interface água-ar. São também apresentados os campos de velocidade correspondentes aos diferentes cenários analisados. De forma geral, observa-se que o escoamento sofre acelerações e desacelerações ao longo da escadaria, com aumento das velocidades, além da ocorrência de estagnações e elevação da altura do escoamento devido à mudança de direção imposta pela curva. Os padrões do escoamento nas proximidades da curva mudam em função da vazão aplicada. Para a vazão menor, nota-se a ocorrência de uma zona estagnada e um redirecionamento de curvatura suave. Para as vazões do cenário baseado na chuva registrada (Cenário 1) e a chuva com 2 anos de tempo de recorrência (Cenário 2) não são observadas diferenças significativas, uma vez que as vazões são relativamente próximas.

As Figuras 4e e 4f apresentam os resultados para o cenário 3, com maior vazão. Observa-se um aumento significativo da posição da superfície livre na região contato com o muro onde ocorre a mudança de direção. Nota-se também que houve um aumento da velocidade máxima. Estas duas variáveis combinadas estão associadas ao maior risco de queda quando pessoas tentam transitar parcialmente imersas em escoamentos.

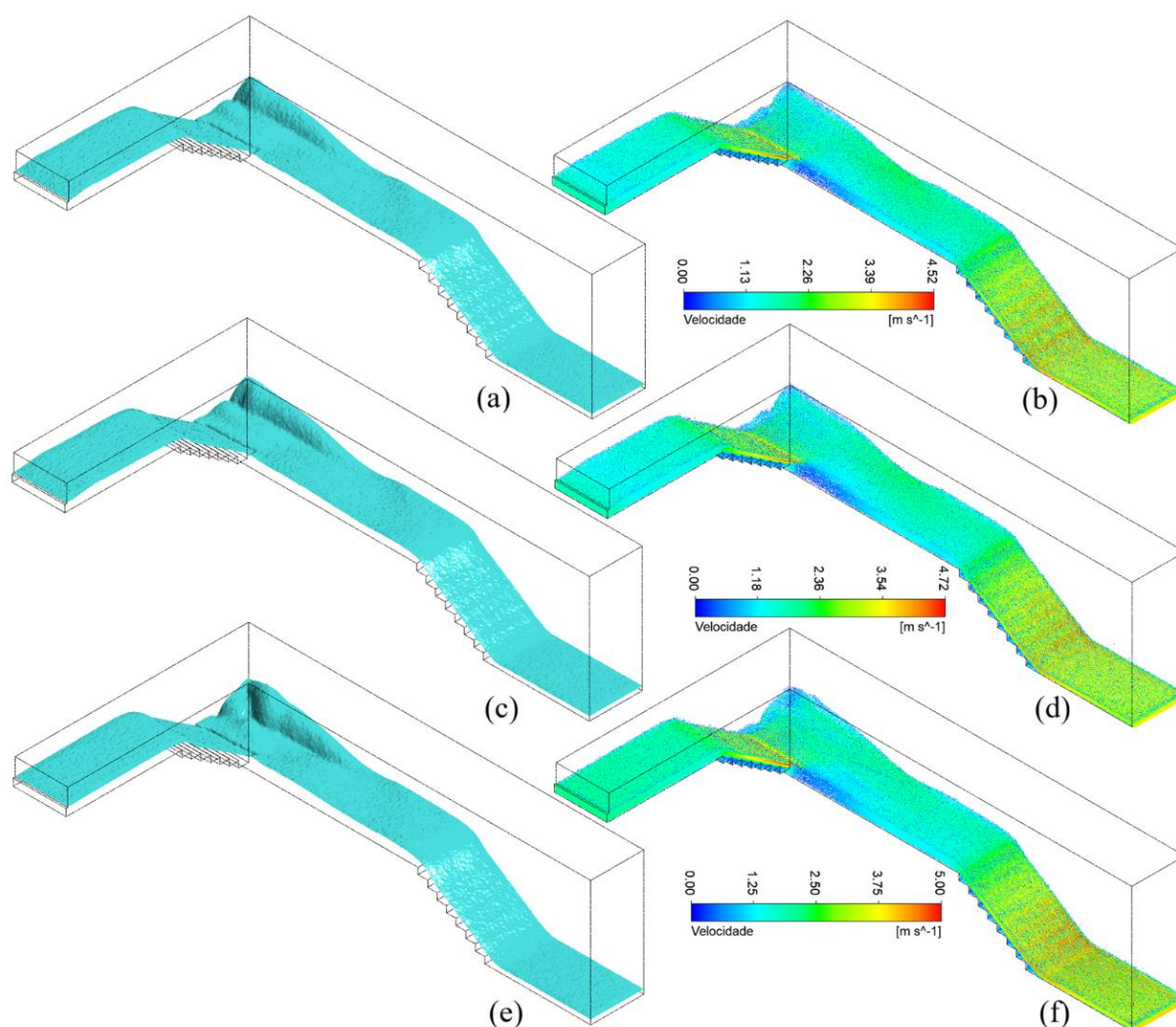


Figura 4 – Iso-superfícies para fração volumétrica de ar igual a 0,9 e campos de velocidades: (a e b) cenário 2; (c e d) cenário 1; (e e f) cenário 3 (maior vazão).

A Figura 5 apresenta as vistas laterais do escoamento ao longo dos degraus, permitindo a identificação dos regimes característicos em função da vazão e demais condições estabelecidas para os cálculos. Nos cenários de menor vazão (Figuras 5a a 5d), observa-se um padrão compatível com o regime deslizante sobre turbilhões. Nota-se que para a declividade e vazões simuladas para os cenários 1 e 2 há uma interferência entre a esteira formada a partir da esquina do degrau e o piso do degrau, caracterizando o sub-regime SK1 (Chanson, 2002, p.142). Nos cenários de maior vazão (Figuras 5e e 5f), o escoamento também assume características típicas do regime deslizante sobre turbilhões na parte superior e inferior do canal e, embora a vazão seja 30% maior que a vazão do cenário 1, não é observada mudança significativa de regime, como o deslocamento do ponto de estagnação presente sobre o piso do degrau para jusante.

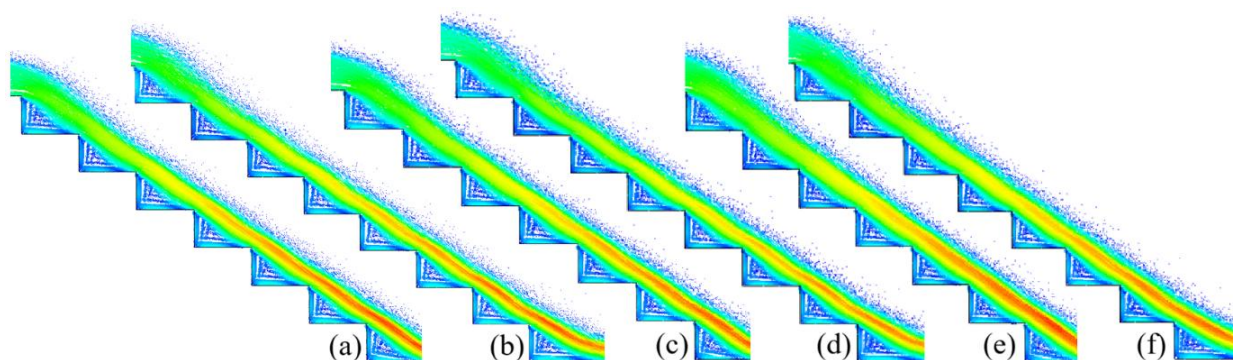


Figura 5 – Vistas laterais dos canais em degraus superior e inferior: (a) cenário 1 – canal superior; (b) cenário 2 – canal inferior; (c) cenário 2 – superior e (d) inferior; (e) cenário 3 – inferior e (f) superior. Legenda de cores (ver Figura 4).

Com o intuito de realizar uma comparação qualitativa com as condições locais, realizou-se também uma simulação com vazão reduzida em relação às demais, igual a  $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ . A fotografia da Figura 6a ilustra um escoamento intenso ao longo da escadaria, caracterizado por elevada turbulência, aeração e presença de sedimentos em suspensão, evidenciada pela coloração observada. Verifica-se boa concordância com os resultados numéricos, em particular com o padrão da Figura 6c, associado ao regime de quedas sucessivas, simulado para uma vazão de  $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ , consideravelmente inferior às vazões empregadas nos cenários 1 a 3. Embora os metadados das imagens não possam ser confirmados, a análise relativa indica que o escoamento da Figura 6a ocorreu cerca de 49 min antes daquele da Figura 6b. Nesse contexto, o padrão da Figura 6b sugere regime de transição, com queda no primeiro degrau, seguida por superfície ondulada nos degraus intermediários e novas quedas a jusante, caracterizando a ausência de um padrão único.

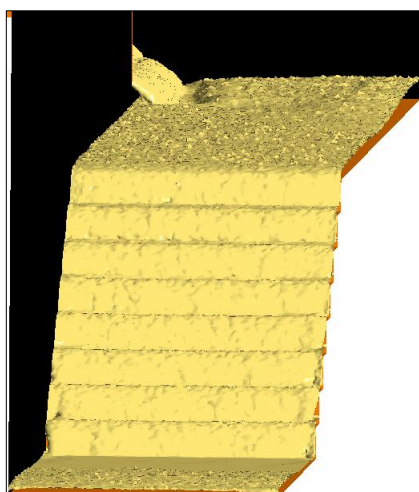


(a)



(b)

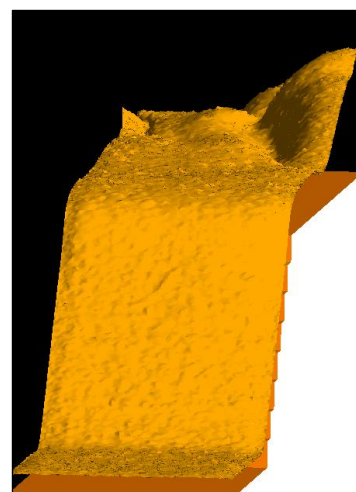
Figura 6 – Comparação qualitativa entre fotos do local (a e b) e resultados da simulação: (c) vazão de  $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ ; (d) cenário 1; (e) cenário 3.



(c)



(d)



(e)

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que o comportamento hidráulico da escadaria analisada depende fortemente das vazões de entrada, com a possibilidade de ocorrência do regime de quedas sucessivas para vazões baixas decorrentes de eventos hidrológicos mais frequentes, transição entre regimes e deslizante sobre turbilhões ao longo do escoamento. Essa variação influencia diretamente a distribuição de velocidades e as alturas de escoamento, variáveis diretamente ligadas à estabilidade de pessoas parcialmente imersas em escoamentos. A presença de mudança de direção em planta mostrou-se relevante, promovendo redistribuição transversal do escoamento e formação de zonas localizadas de estagnação e aceleração da água, com padrões dependentes da vazão. Esses efeitos não são capturados por geometrias idealizadas, evidenciando a importância da consideração de configurações reais.

A comparação entre as abordagens hidrológicas adotadas mostrou que a definição (ou os valores de estudo) das vazões influencia significativamente os resultados hidrodinâmicos, modificando tanto os valores de velocidade quanto os regimes de escoamento estabelecidos. Os resultados reforçam a necessidade de abordagens integradas que considerem simultaneamente a modelagem hidrológica e a análise hidrodinâmica em geometrias reais, contribuindo para uma melhor compreensão do funcionamento de escadarias drenantes em ambientes urbanos.

## REFERÊNCIAS

ADASA. *Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. Manual de drenagem e manejo de águas pluviais*. Brasília, 2018.

ANSYS. (2021). *Ansys CFX®*. Canonsburg, PA: Ansys Inc.

CHANSON, H. (2002). *The hydraulics of stepped chutes and spillways*. The Netherlands: A. A.

Balkema Publishers, 2002. 384 p.

COLLISCHONN, W., & Dornelles, F. *Hidrologia para engenharia e ciências ambientais*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos-ABRH, 2013.

ISHII, M.; HIBIKI, T. *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*, 2nd ed.; Springer: New York, NY, USA, 2011.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. *The numerical computation of turbulent flows*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 3, n. 2, p. 269–289, 1974.

MANGIERI, L.S.G. (2012). *Avaliação dos sistemas de escadarias e rampas drenantes implantadas em assentamentos espontâneos na cidade do Salvador – Bahia*. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2012.

MENTER, F. R. *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*. AIAA Journal, v. 32, n. 8, p. 1598–1605, 1994.

PMS – Prefeitura Municipal de Salvador. Ortofotos de 2017 da Prefeitura de Salvador, em Sirgas2000. Acesso em 25 de abril de 2026, disponível em <https://www.sefaz.salvador.ba.gov.br>

PORTO, R.M. (2006). *Hidráulica Básica*. EESC/USP São Carlos- SP, 540 p.

TUCCI, C. E. M. (2005). *Modelos Hidrológicos*. 2ª ed. Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH.

USACE, U.S. Army Corps of Engineers. *Hydrologic Engineering Center*. HEC-HMS Hydrologic. Reference Manual Version 4.12, 2023

WILCOX, D. C. *Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models*. AIAA Journal, v. 26, n. 11, p. 1299–1310, 1988.

XAVIER, A. C., Scanlon, B. R., King, C. W., & Alves, A. I.. *New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020)*. International Journal of Climatology, 42(16), 8390–8404, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.7731>.

**AGRADECIMENTOS** – Os autores agradecem ao CNPq (processo nº 404127/2025-8) pelo suporte financeiro; ao Laboratório de Propriedades Óticas – LAPO do Instituto de Física da UFBA e à Petrobras pelo apoio com recursos computacionais; ao Prof. Lúcio Sérgio Garcia Mangieri, pelas fotos dos escoamentos na escadaria (Fig.6a,b); à CAPES, código 001 e processos 88881.708215/2022-01 e 88881.691452/2022-01, do PPG Meio Ambiente, Águas e Saneamento da UFBA.