

## TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM CANAIS COM O FUNDO EM DEGRAUS: MECANISMOS E PROPOSIÇÃO DE ESTRUTURAS DESARENADORAS

Victoria Silvia Guimarães de Oliveira<sup>1</sup>; André Luiz Andrade Simões<sup>1</sup>; Luciano Matos Queiroz<sup>1</sup>  
*Autor para correspondência: victoria.oliveira12@hotmail.com*

<sup>1</sup>Universidade Federal da Bahia

### RESUMO

O conhecimento sobre as características de escoamentos de água em canais em degraus tem evoluído com a realização de análises e experimentos sobre a energia dissipada, aeração e outros fenômenos. Contudo, há considerável lacuna no conhecimento sobre o transporte de sedimentos em estruturas hidráulicas desse tipo. Este trabalho expõe resultados obtidos por meio de simulações numéricas efetuadas com as equações de Navier-Stokes, conservação de massa e o modelo de Turbulência  $k-\epsilon$ , escritas sob a forma do modelo multifásico não-homogêneo. Os cálculos foram realizados em três domínios: um canal em degraus convencional, um canal em degraus com soleiras nas extremidades finais dos pisos e um canal em degraus com cavidades sobre os pisos. Para todos os casos, foram adotadas condições relativas ao escoamento do tipo quedas sucessivas sem a formação de ressaltos hidráulicos. A análise do campo de velocidade possibilitou identificar o mecanismo responsável pela ocorrência da sedimentação no escoamento em questão. As simulações mostraram que o canal em degraus convencional foi, dentre os três, o que reteve menor quantidade de sedimentos, seguido pelo canal com soleiras terminais e pelo canal com cavidades, respectivamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** canal em degraus; Dinâmica dos Fluidos Computacional; Transporte de sedimentos

### INTRODUÇÃO

Desde a década de 1970, os escoamentos em canais com o fundo em degraus têm sido estudados principalmente devido ao crescente uso do concreto compactado a rolo (CCR) para a construção de barragens. O uso de CCR implica erigir a estrutura em camadas paralelepípedicas, condição que resulta em um paramento de jusante escalonado e em canais de queda com o fundo em degraus. Esse resultado geométrico resulta em uma maior dissipação de energia do escoamento em relação aos canais com o fundo em concreto liso e, conseqüentemente, a bacia de dissipação por ressalto hidráulico pode ter seu comprimento reduzido. Por esse motivo, a maior parte de trabalhos sobre o tema buscou respostas sobre a dissipação de energia e outras características relacionadas ao projeto do sistema extravasor, como o desenvolvimento da camada limite e o início da aeração superficial, o comportamento do campo de pressão e sua relação com o risco de cavitação, o comportamento do campo de fração volumétrica de ar e os fenômenos relacionados, como a elevação da altura de escoamento, a formação de spray e as transferências de massa através da interface ar-água.

Além da hidráulica de barragens, canais com o fundo em degraus têm sido utilizados como descidas d'água destinadas à drenagem em taludes (DNIT, 2006), em grandes canais urbanos que necessitem vencer desníveis topográficos consideráveis, com o intuito de reduzir a carga cinética e, conseqüentemente, erosões (TOOMBES, 2002), como canais destinados à aeração e transferência de gases através da interface ar-água, em tratamento de água (TOOMBES, 2002) e esgoto. Porém, dentre todos os estudos sobre escoamentos em canais em degraus, pouca ou nenhuma atenção foi dada ao transporte de sedimentos nessas estruturas.

### OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho teve como objetivo estudar o transporte de sedimentos em escoamentos do tipo quedas sucessivas em canais em degraus por meio de simulação numérica. Como objetivos específicos, foram enunciados: calcular o volume de sedimento retido em canal em degraus com geometria convencional; identificar os mecanismos responsáveis pela separação entre as fases; propor formas para os degraus que elevem a capacidade de retenção de sedimento.

### MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizadas simulações numéricas em um domínio computacional com seis degraus com as seguintes características: comprimento do piso,  $l = 0,50$  m; altura do degrau  $s = 0,30$  m; altura do canal igual a  $1,80$  m; comprimento do canal igual a  $3,0$  m. Essas características geométricas, definidas por Oliveira (2018), correspondem à área ocupada por um desarenador convencional semelhante ao da estação de tratamento de

esgoto Cidade Vargas, apresentada na publicação de Afini Jr. (1971). O mesmo estudo levou à definição da vazão de 25 L/s, com fração volumétrica de sólidos igual a 0,2%, com densidade de 1.800 kg/m<sup>3</sup>. Oliveira (2018) determinou a altura dos degraus para que ocorresse o escoamento em quedas sucessivas, com  $h/l = 0,60$ , empregando metodologia apresentada por Simões (2008).

### *Simulação numérica*

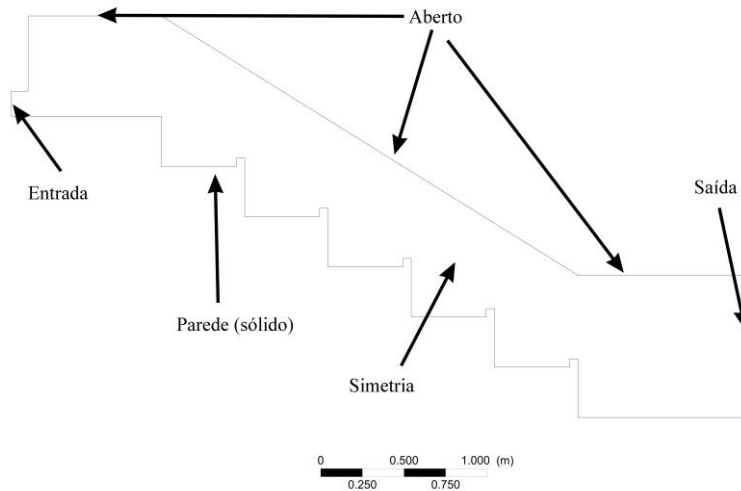
A representação física-matemática do escoamento multifásico foi realizada com as equações de conservação de massa e equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds, ambas escritas com modelo euleriano-euleriano. Há modelos para escoamentos multifásicos que compartilham todos os campos entre as fases, exceto os campos de frações volumétricas (das fases). Esse tipo de abordagem resulta no denominado modelo homogêneo. Quando apenas o campo de pressões é compartilhado entre as fases e a interação entre elas é modelada com termos de transferência interfacial (de massa, quantidade de movimento), o modelo é denominado como não-homogêneo (Simões, 2012). Seguindo recomendação de Simões (2012), que simulou escoamentos em canais em degraus, Oliveira (2018) adotou o modelo de turbulência k- $\epsilon$  e o modelo multifásico não-homogêneo, pois dentre os modelos existentes, são os mais adequados à modelagem dos referidos escoamentos. Desse modo, os resultados apresentados aqui foram obtidos por Oliveira (2018) empregando o modelo não-homogêneo com a versão acadêmica de um *software* comercial de dinâmica dos fluidos computacional ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Para resolução numérica do sistema de equações diferenciais parciais que compõem o referido modelo, é empregado o método de volumes finitos. Detalhes sobre as equações podem ser encontrados em CFX (2004) e Simões (2012).

### *Domínio computacional, condições de contorno e malha*

A investigação iniciou com a simulação em um domínio com degraus convencionais. Em seguida, com a observação das características dos campos que representam os escoamentos (velocidade, pressão, fração de vazios), foram realizadas modificações nas formas dos degraus com o objetivo de verificar o aumento da quantidade de sedimentos retidos. Para todos os casos, as simulações foram realizadas em regime permanente e em domínios bidimensionais devido à capacidade computacional limitada a tais condições, correspondente a um processador Intel® Core™ i7 e 16 GB de memória RAM.

A Figura 1 ilustra a localização das condições de contorno do problema. A condição de contorno de entrada corresponde à imposição de uma distribuição de velocidades uniforme com 0,30 m/s, valor que corresponde à vazão mencionada, e das frações volumétricas das duas fases, água e sedimentos com fração volumétrica de 0,2%. A condição de contorno denominada saída foi estabelecida levando em consideração que o escoamento se encontrava no regime supercrítico próximo à saída, portanto, com autovalores (da parte hiperbólica do problema) positivos, o que conduz ao uso de gradientes nulos para velocidades e frações de vazios. A parte superior, expressa como um contorno aberto, utiliza gradientes nulos para velocidades e a imposição de fração volumétrica de ar igual à unidade para permitir o escoamento apenas de ar através do topo. Cabe citar que, para realização das simulações, adotou-se a massa específica do ar igual a 1,185 kg/m<sup>3</sup> e da água igual a 997 kg/m<sup>3</sup>. Para a parede é empregada uma lei de parede e o uso da rugosidade do concreto com acabamento normal, com rugosidade absoluta equivalente igual a 0,2 mm. As laterais do domínio foram modeladas com a condição de contorno de simetria porque o problema é tratado como bidimensional. Foram empregadas malhas não estruturadas com: 78.364 nós e 38.585 elementos para o canal em degraus convencional; 75.384 nós e 37.083 elementos para o canal com soleiras terminais e 79.160 nós e 38.875 elementos para o canal com cavidades. As resoluções adotadas foram escolhidas para que as características predominantes do escoamento multifásico fossem capturadas, com a separação entre as fases líquida, sólida e gasosa sem comprometer as resoluções das interfaces e, considerando o tempo disponível para realização do trabalho e o seu custo computacional.

**Figura 1 – Condições de contorno**



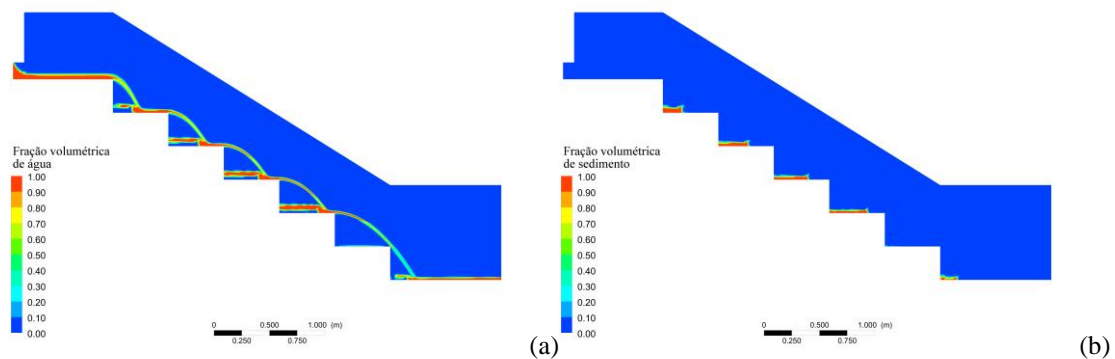
*Pós-processamento*

O pós-processamento utilizou representações gráficas para as grandezas de campo vetorial e escalar que expressam seus valores associados a cores e vetores. Como estratégia para quantificar os volumes de sólidos retidos foi necessário utilizar um software CAD devido às limitações do código de CFD. Tendo sido realizadas simulações bidimensionais, os referidos volumes são volumes por unidade de comprimento, comprimento este perpendicular à lateral denominada simetria, na Figura 1.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados obtidos em todos os domínios computacionais elaborados correspondem ao escoamento em quedas sucessivas, tal como previsto. A Figura 2a possibilita a visualização da fração volumétrica de água para as condições simuladas. Constata-se que ocorre escoamento em quedas sucessivas sem formação de ressalto hidráulico sobre os pisos dos degraus, com jatos cujos alcances são crescentes no sentido do escoamento. A Figura 2b permite visualizar a região do domínio computacional ocupada pelo sedimento e fica evidente que o sedimento é depositado abaixo dos jatos, sendo seu comprimento proporcional ao alcance do jato desde que este colida com o piso. O sedimento total retido pelo canal ocupa uma área igual a 0,0254 m<sup>2</sup>.

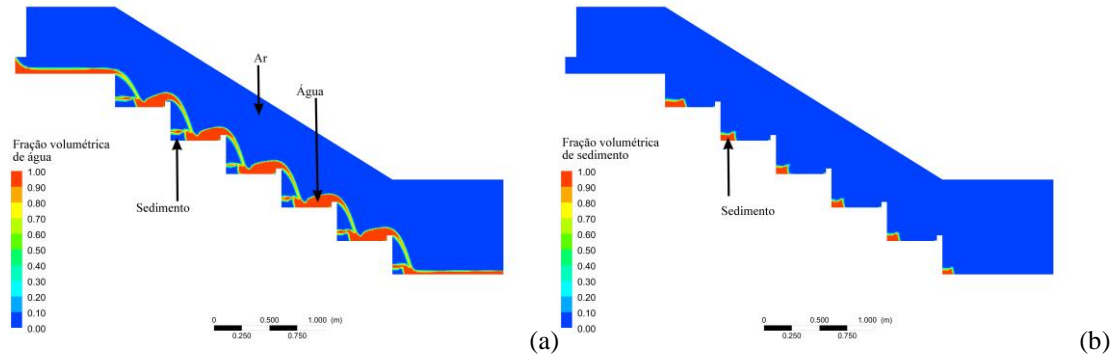
**Figura 2 – Canal em degraus com geometria convencional: (a) Campo de fração volumétrica de água; (b) Campo de fração volumétrica de sedimento.**



Com o intuito de desenvolver uma geometria capaz de reter mais sedimentos, os cálculos foram realizados em um canal em degraus com soleiras de 5,0 cm de comprimento por 5,0 cm de altura, sobre os pisos, em suas extremidades a jusante conforme mostra a Figura 3. As elevadas velocidades a jusante das regiões de colisão dos jatos com os pisos impediram a ocorrência de sedimentação nas proximidades das soleiras e, assim como nas simulações sem uso das soleiras, o sedimento foi acumulado abaixo dos jatos. Com base nos resultados apresentados nas Figuras 3a e 3b, todos os jatos colidiram com os pisos subsequentes, possibilitando o uso de

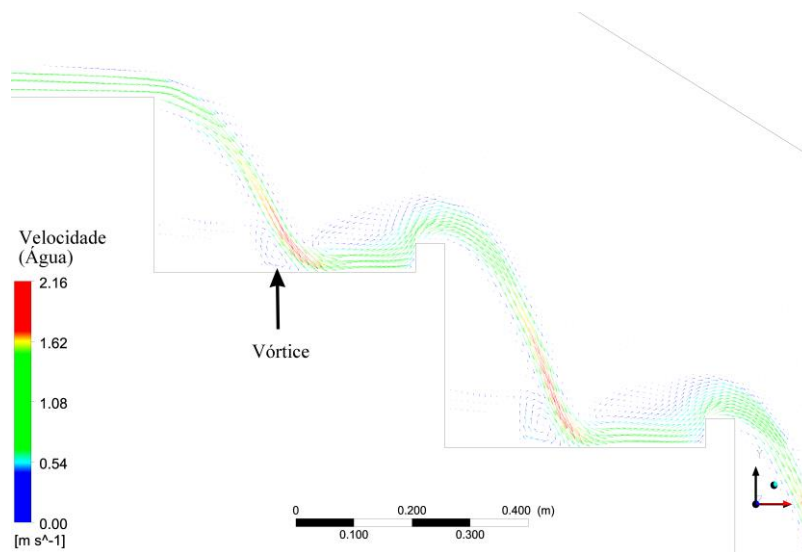
todos os degraus para a retenção de sedimentos. A área total ocupada pelo sedimento resultou em 0,0348 m<sup>2</sup>, valor 37% maior em relação ao anterior.

**Figura 3 – Canal em degraus com soleiras terminais: (a) Campo de fração volumétrica de água; (b) Campo de fração volumétrica de sedimento.**



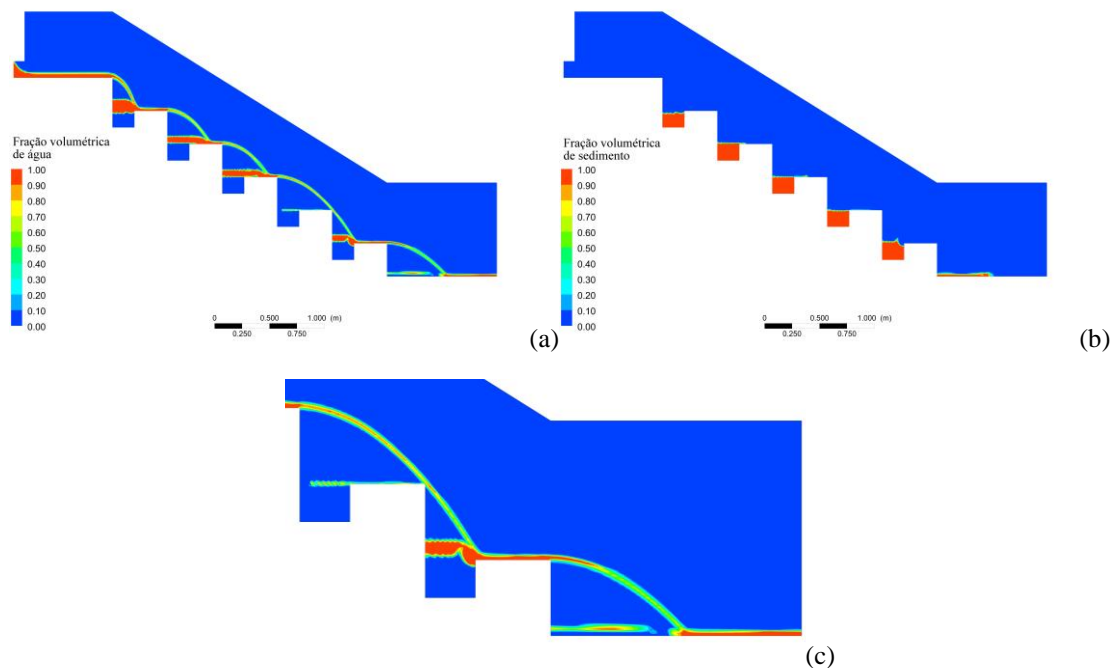
De acordo com experimentos realizados por Rand (1955) o escoamento de água em canais em degraus, em regime de quedas sucessivas, forma grandes turbilhões abaixo da lâmina vertente. A inclusão de sedimentos, de acordo com os resultados obtidos, modifica o escoamento levando à formação de área estagnada preenchida pela fase mais densa e de um vórtice entre a face inferior do jato e a superfície frontal da região com sedimento, como pode ser visto na Figura 4. Esse vórtice é o mecanismo responsável pela deposição de sedimento nas áreas visualizadas.

**Figura 4 – Campo de velocidade**



A identificação dos padrões apresentados anteriormente levou à proposição de uma nova forma para o canal escalonado, com a inclusão de cavidades de 20 cm de largura, como pode ser visto na Figura 5. Após a realização da simulação numérica, todas as cavidades foram preenchidas pelo sedimento, tendo resultado em uma área total ocupada pela fase mais densa igual a 0,1493 m<sup>2</sup>, valor 329% maior que o obtido no canal com soleiras. O penúltimo jato aparentemente ultrapassa o penúltimo degrau, mas, como ilustrado na Figura 5c, ele colide com a extremidade final do piso tornando possível o transporte de sedimentos.

**Figura 5 – Canal em degraus com cavidades: (a) Campo de fração volumétrica de água; (b) Campo de fração volumétrica de sedimento.**



## CONCLUSÃO

Com a realização das simulações numéricas, concluiu-se que, para a concentração de sedimentos simulada, o método de previsão dos regimes de escoamento, desenvolvido para água, previu de forma correta a ocorrência do escoamento em quedas sucessivas. O acúmulo de sedimentos ocorreu nas proximidades dos espelhos dos degraus, abaixo das lâminas vertentes, região caracterizada por recirculação em escoamento apenas de água. A troca de massa entre as fases líquida e sólida ocorre com a formação de um grande turbilhão entre a face inferior do jato e o volume de sedimento acumulado e, a colisão do jato com o degrau subsequente é essencial para que ocorra a sedimentação. As simulações demonstraram que o canal em degraus convencional propicia a sedimentação de um volume menor em relação ao canal em degraus com soleiras terminais. Quanto aos degraus com soleiras, concluiu-se que a retenção persiste na mesma posição, *i.e.*, abaixo da lâmina vertente e nas proximidades do espelho. A existência das soleiras favoreceu a formação de jatos com alcances aproximadamente semelhantes, evitando o salto entre degraus. A inclusão de cavidades nos pisos elevou sobremaneira a retenção de sedimentos, resultando em uma área 329% maior em relação àquela retida pelo canal com soleiras terminais.

## APOIO

À Pró-Reitoria de Pesquisa, Criação e Inovação e a Pró-Reitoria de Ensino de Pós-Graduação da Universidade Federal da Bahia.

## REFERÊNCIAS

- AFINI Jr., B. As pequenas estações de tratamento de esgotos operadas pela SAEC. Revista DAE, Vol. 91, 1971.
- CFX. CFX Solver Theory. Ansys Canada Ltda., Waterloo, Ontario, p. 250, 2004.
- DNIT (2006). Manual de drenagem de Rodovias- 2. ed. - Rio de Janeiro, Brasil. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa.
- OLIVEIRA, Victoria Silvia Guimarães de. Simulação numérica do transporte de areia em canal em degraus utilizado como desarenador para tratamento de esgoto. 63 f. il. 2018. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

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. Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus: metodologias adimensionais para pré-dimensionamento. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SIMÕES, A. L. A. escoamentos Turbulentos em Canais com o Fundo em Degraus: Resultados Experimentais, Soluções Numéricas e Proposições Teóricas. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

TOOMBES, L. Experimental Study of Air-Water Flow Properties on Low-Gradient Stepped Cascades. Tese (Doutorado) - Faculty of Engineering, Physical Sciences and Architecture - University of Queensland, Brisbane, Australia, 2002.