



## Avaliação de *softwares* de modelos numéricos 2D e 3D para estudos de ruptura hipotética de barragens

Stella Braga de Andrade<sup>1</sup>, Wesley Leonel de Souza<sup>2</sup>, Ana Clara Gomes de Araújo<sup>3</sup>,

Ana Carolina Canossa Becker<sup>4</sup> & Vítor Lages do Vale<sup>5</sup>

**Resumo:** A modelagem de um estudo de ruptura hipotética é um processo complexo que envolve diversos fatores físicos, hidrológicos, geomorfológicos e socioeconômicos. A escolha do *software* adequado para realizar essa modelagem é fundamental para obter resultados confiáveis e precisos, que possam subsidiar a tomada de decisão em situações de emergência. Neste trabalho, foi feita uma revisão bibliográfica sobre os principais *softwares* disponíveis para a modelagem de um dam break, tanto em duas quanto em três dimensões, destacando suas vantagens, limitações e aplicações. Foram analisados os *softwares* RiverFlow 2D, Flo 2D, HEC-RAS, Mike 21, Flow3D e OpenFoam, indicando seus recursos, requisitos, interface, custo e percepção do usuário. Os resultados mostraram que não há um *software* ideal para a modelagem de um dam break, mas sim aquele que melhor se adapta às características e objetivos de cada caso. A escolha do *software* deve levar em conta a complexidade do fenômeno, a disponibilidade de dados, o tempo de processamento, a qualidade da saída e o custo-benefício da ferramenta.

**Abstract:** Modeling a dam break is a complex process that involves various physical, hydrological, geomorphological, and socioeconomic factors. Choosing the appropriate software for this modeling is essential to obtain reliable and accurate results that can support decision-making in emergency situations. In this work, a literature review was conducted on the main software available for dam break modeling, both in two and three dimensions, highlighting their advantages, limitations, and applications. The software analyzed included RiverFlow 2D, Flo 2D, HEC-RAS, Mike 21, Flow3D, and OpenFoam, describing their features, requirements, interface, cost, and user perception. The results showed that there is no ideal software for dam break modeling, but rather the one that best suits the characteristics and objectives of each case. The choice of software should consider the complexity of the phenomenon, data availability, processing time, output quality, and the cost-benefit ratio of the tool.

**Palavras-Chave:** Ruptura de Barragem; modelos numéricos; *softwares*.

**Keywords:** Dam Break; numerical models; *softwares*.

### INTRODUÇÃO

A modelagem é uma etapa fundamental no estudo de ruptura hipotética. Através dessa importante ferramenta, são avaliados os possíveis cenários de inundação e os parâmetros hidrodinâmicos (velocidade, profundidade, vazão, etc.), identificando assim as áreas de risco para elaboração dos planos de contingência e de ações de emergência, que visam mitigar os impactos do evento. A modelagem pode ser realizada por meio de métodos analíticos, empíricos ou numéricos, sendo este último o mais utilizado na prática, devido à sua maior flexibilidade e capacidade de representar a complexidade do fenômeno (Wahl, 1998; Singh e Snorrason, 2004; USACE, 2010).

Os métodos numéricos resolvem as equações que governam o escoamento, que podem ser as equações de conservação de massa e quantidade de movimento (equações de Saint-Venant), em uma

1 ) HIDROBR - Stella Braga de Andrade - (31) 3504-2733 (stella.andrade@hidrobr.com)

2 ) HIDROBR / UFPR - Wesley Leonel de Souza - (31) 3504-2733 (wesley.souza@hidrobr.com)

3 ) HIDROBR – Ana Clara Gomes de Araujo - (31) 3504-2733 (ana.araujo@hidrobr.com)

4 ) HIDROBR/UFPR – Ana Carolina Canossa Becker - (31) 3504-2733 (ana.becker@hidrobr.com)

5 ) HIDROBR – Vítor Lages do Vale - (31) 3504-2733 (vitor.lages@hidrobr.com)



ou duas dimensões horizontais, ou as equações de Navier-Stokes, em três dimensões. Essas equações são discretizadas em uma malha computacional, que pode ser regular ou irregular, estruturada ou não estruturada, e resolvidas por meio de algoritmos numéricos, que podem ser explícitos ou implícitos, finitos ou infinitos, entre outros. A escolha do método numérico depende do grau de simplificação ou detalhamento que se deseja obter na modelagem, bem como da disponibilidade de dados, do tempo de processamento e da qualidade da saída (Fread, 1991; Wahl, 1998; Singh e Snorrason, 2004; USACE, 2010).

Existem diversos *softwares* que implementam os métodos numéricos para a modelagem de um estudo de ruptura hipotética, cada um com suas características, vantagens, limitações e aplicações. A escolha do *software* adequado para cada caso é uma tarefa que requer conhecimento técnico, critério e experiência, pois pode influenciar significativamente nos resultados e na tomada de decisão. Neste trabalho, foi feita uma revisão bibliográfica sobre os principais *softwares* disponíveis, tanto em duas quanto em três dimensões, destacando seus recursos, requisitos, interface, custo e validação. O objetivo é fornecer uma visão geral e descritiva dessas ferramentas, que possa auxiliar os usuários na escolha do *software* mais apropriado para seus estudos.

## MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho consistiu em realizar uma pesquisa bibliográfica sobre os *softwares* de modelagem para um estudo de ruptura hipotética, buscando informações em artigos científicos, relatórios técnicos, manuais, sites e outras fontes. Foram selecionados seis *softwares*, sendo quatro de duas dimensões (RiverFlow 2D, Flo 2D, Mike 21 e HEC-RAS) e dois de três dimensões (Flow3D e OpenFoam), que foram analisados e descritos segundo os seguintes critérios:

- Recursos: refere-se às funcionalidades e capacidades do *software*, tais como tipo de equação resolvida, tipo de malha utilizada, condições de contorno e iniciais, tratamento de estruturas hidráulicas, acoplamento com outros modelos, etc.

- Requisitos: refere-se aos requisitos mínimos e recomendados para a instalação e execução do *software*, como sistema operacional, processador, memória, espaço em disco, placa de vídeo, etc.

- Interface: refere-se à interface gráfica, que pode facilitar ou dificultar o uso, tais como facilidade de entrada e saída de dados, visualização e edição da malha, geração de gráficos, etc.

- Custo: refere-se ao custo de aquisição e manutenção do *software*, que pode ser gratuito, pago ou dependente de licença, bem como ao custo de treinamento e suporte técnico, que pode ser oferecido pelo desenvolvedor ou por terceiros.

- Percepção do usuário: refere-se a publicações de autores que simularam casos reais de ruptura de barragens com diferentes *softwares* apresentando as vantagens e desvantagens em relação a cada um deles.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A capacidade de cada *software* de modelar a ruptura de uma barragem depende de vários fatores, como a geometria do reservatório, as características do fluido, as condições iniciais e de contorno, e os objetivos da análise. Assim, não há um *software* que seja universalmente superior aos demais, mas sim aquele que melhor se adapta às necessidades de cada caso.

Os *softwares* de duas dimensões são mais adequados para situações em que a variação vertical da velocidade e da pressão é pequena, e o escoamento é predominantemente horizontal. Eles também são mais rápidos e simples de executar, exigindo menos recursos computacionais e dados de entrada. Por outro lado, eles são menos precisos e detalhados do que os *softwares* de três dimensões, que podem capturar os efeitos tridimensionais do escoamento, como a formação de vórtices, a separação da camada limite e a interação com estruturas. Os *softwares* de três dimensões são mais indicados para situações em que a variação vertical da velocidade e da pressão é significativa, e o escoamento



é fortemente influenciado pela geometria, pela topografia ou com uma interação complexa com outra estrutura.

Contudo, os *softwares* tridimensionais possuem uma representação mais complexa da reologia, fator este crucial para modelagens de barragens de rejeitos com fluidos não-newtonianos. A representação da reologia em modelos 3D é um campo desafiador devido à complexidade dos modelos de turbulência, à necessidade de alta resolução espacial e temporal, e às limitações computacionais. Embora avanços significativos tenham sido feitos, como o uso de LES (Large Eddy Simulation) e DNS (Direct Numerical Simulation), esses métodos ainda são limitados por seus altos custos computacionais.

A viscosidade afeta diretamente a formação e a dissipação de estruturas turbulentas. Em fluidos não newtonianos, a viscosidade pode variar com a taxa de deformação, o que torna mais complexa a modelagem. Modelos de viscosidade turbulenta, como o modelo de viscosidade de redemoinho (eddy-viscosity), são frequentemente utilizados, mas podem não capturar todos os detalhes necessários para escoamentos complexos (FLOW-3D, 2023 e Konečný & Ševčík, 2016).

Entre os *softwares* de duas dimensões, o RiverFlow 2D é capaz de modelar desde fluxos laminares até fluxos turbulentos, com ou sem sedimentos, em canais naturais ou artificiais. Ele também permite a utilização de malhas flexíveis e refinadas, que se ajustam à geometria e às condições do escoamento. O Flo 2D é outro *software* de duas dimensões que possui opções de modelagem similar ao RiverFlow 2D. Ele também pode simular os efeitos de inundações, erosão, deslizamentos, etc.

O HEC-RAS é um *software* de duas dimensões que se sobressai por sua versatilidade, sendo amplamente utilizado em estudos hidrológicos e hidráulicos. Além das opções de modelagem similares aos *softwares* anteriores, ele também pode acoplar os modelos bidimensionais com os modelos unidimensionais, permitindo uma análise integrada do escoamento. O HEC-RAS é um *software* gratuito, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Estudos comparativos, como o de Spero e Calhoun (2022), indicam que o HEC-RAS é frequentemente preferido devido à sua estabilidade e baixo custo computacional. Recentemente foi disponibilizada a versão deste *software* capaz de modelar fluidos não newtonianos, contudo, por ser um módulo novo, ele ainda foi pouco explorado na literatura.

O Mike 21 é um *software* de duas dimensões que se resalta por sua abrangência por também simular os efeitos de qualidade da água, ecologia, recirculação, etc. Esse *software* foi usado por Wang et al. (2017) para simular o escoamento em um estuário na China.

Entre os *softwares* de três dimensões, o FLOW-3D é um dos mais avançados e completos, sendo capaz de modelar fluxos tridimensionais em regime laminar ou turbulento, com ou sem transferência de calor, em meios porosos ou não porosos, com ou sem superfície livre, com ou sem transporte de sedimentos, em geometrias complexas e variáveis. Ele também pode simular os efeitos de estruturas hidráulicas, como comportas, vertedouros, turbinas, etc.

O OpenFoam é outro *software* de três dimensões que se sobressai por sua robustez e flexibilidade, sendo capaz de modelar fluxos tridimensionais em regime laminar ou turbulento, possuindo, no mínimo, a mesma versatilidade de aplicações do FLOW-3D. Ele também pode acoplar os modelos tridimensionais com os modelos bidimensionais ou unidimensionais, permitindo uma análise integrada do escoamento. O OpenFoam é um *software* de código aberto, desenvolvido pela OpenCFD Ltd.

Os resultados da análise dos *softwares* de modelagem de um dam break são apresentados na Tabela 1, com base nos critérios definidos anteriormente. As fontes das informações são os próprios



desenvolvedores dos *softwares* além dos autores que simularam casos reais de ruptura de barragens com estes.

Alguns estudos foram desenvolvidos ao longo dos anos para, através de dados experimentais ou observacionais de eventos reais de ruptura de barragens verificar a precisão dos *softwares*. A maioria dos artigos concluiu que os *softwares* apresentaram boa concordância com os dados reais, mas alguns deles destacaram as limitações de cada *software* em relação a aspectos como a discretização do domínio, o tratamento das condições de contorno, a turbulência, a viscosidade e a tensão superficial. Alguns artigos também compararam os *softwares* entre si, indicando as vantagens e desvantagens de cada um em termos de precisão, robustez, tempo de execução e facilidade de uso.

Entre os artigos encontrados, destacam-se os seguintes estudos de caso: (a) a simulação da ruptura da barragem de Malpasset, na França, em 1959, usando os *softwares* RiverFlow 2D, Flo 2D, Mike 21 e HEC-RAS (Dias et al., 2019); (b) a simulação da ruptura da barragem de Gleno, na Itália, em 1923, usando os *softwares* RiverFlow 2D, Flo 2D e Flow3D (O'Brien et al., 2014); (c) a simulação da ruptura da barragem de Vajont, na Itália, em 1963, usando os *softwares* Mike 21 e OpenFoam (Zhao et al., 2018); e (d) a simulação da ruptura da barragem de Fundão, no Brasil, em 2015, usando o *software* OpenFoam (Silva et al., 2019).

## CONCLUSÃO

De acordo com a Canadian Dam Association (CDA) (2021), a escolha do *software* é crucial para a precisão e a confiabilidade dos estudos de ruptura de barragens. A CDA destaca que, embora não haja um *software* que seja universalmente superior, o HEC-RAS é frequentemente recomendado devido à sua versatilidade, confiabilidade e custo-benefício, especialmente em estudos bidimensionais. Sabe-se ainda que o HEC-RAS tem evoluído continuamente desde seu lançamento inicial em 1995, com a versão 6.0 sendo lançada em 2020 e a versão 6.5 em 2024. Reforça-se assim que seu módulo não newtoniano, por ser um módulo novo, ainda foi pouco explorado na literatura.

Além disso, a CDA (2021) menciona que as tecnologias e as melhores práticas para a análise de ruptura de barragens de rejeitos estão em constante evolução. Isso implica que os *softwares* devem ser atualizados regularmente para incorporar os avanços mais recentes no campo. A capacidade do *software* de simular com precisão as perdas de carga, a viscosidade do fluido e outros parâmetros críticos é essencial para garantir que os resultados da modelagem sejam confiáveis e úteis para a gestão da segurança da barragem, avaliação de riscos e planejamento de resposta a emergências.

A escolha entre modelos 2D e 3D deve ser guiada pela complexidade do problema e pelos recursos disponíveis. Embora os modelos 3D ofereçam uma representação mais detalhada, eles também exigem muito mais recursos computacionais e tempo de processamento. Em muitos casos, os modelos 2D são suficientes e até preferíveis devido à sua eficiência e simplicidade.

Portanto, a escolha do *software* não é apenas uma questão técnica, mas também uma questão de segurança e responsabilidade. A CDA (2021) enfatiza que os profissionais de segurança de barragens devem definir e concordar com o escopo e a metodologia que atendam aos objetivos do estudo e aos requisitos estabelecidos pelos reguladores. A seleção de um *software* adequado é um passo crucial nesse processo, garantindo que o estudo de ruptura forneça informações precisas e acionáveis para a mitigação de riscos e a proteção das comunidades a jusante.

Ainda em casos de fluidos não newtonianos reforça-se que a escolha do *software* deve considerar, além da sua capacidade, as propriedades reológicas dos materiais disponível e a expertise necessária para ajustar corretamente os parâmetros de entrada.



Tabela 1 – Descrição dos *softwares* estudados.

<i>Software</i>	Dimensão	Recursos	Requisitos	Interface	Custo	Percepção do usuário
RiverFlow 2D	2D	Modela fluxos laminares e turbulentos, com ou sem sedimentos, em canais naturais ou artificiais. Usa malhas flexíveis e refinadas. Permite a inclusão de estruturas e obstáculos. Aplica as equações de Saint-Venant com o método dos volumes finitos	Processador de 64 bits, 4 GB de RAM, 20 GB de espaço em disco, Windows 7 ou superior	Gráfica e interativa, com menus, botões, janelas e barras de ferramentas. Possui recursos de visualização, edição e exportação de dados. Permite a simulação em tempo real e a geração de relatórios	A partir de US\$ 3.000,00 por licença anual, ou US\$ 9.000,00 por licença perpétua. Oferece descontos para estudantes, professores e agências governamentais	Os usuários relataram que o <i>software</i> é rápido, robusto e fácil de usar, mas que tem dificuldade de representar geometrias complexas e que não possui um modelo de turbulência <sup>1</sup>
Flo 2D	2D	Modela fluxos superficiais e subterrâneos, com ou sem sedimentos, em bacias hidrográficas e planícies aluviais. Usa malhas regulares e quadradas. Permite a inclusão de estruturas e vegetação. Aplica as equações de Saint-Venant com o método das diferenças finitas	Processador de 64 bits, 8 GB de RAM, 100 GB de espaço em disco, Windows XP ou superior	Gráfica e interativa, com menus, botões, janelas e barras de ferramentas. Possui recursos de visualização, edição e exportação de dados. Permite a simulação em tempo real e a geração de relatórios	A partir de US\$ >6.000,00 por licença anual, ou US\$ 18.000,00 por licença perpétua. Oferece descontos para estudantes, professores e agências governamentais	Os usuários relataram que o <i>software</i> é simples, estável e de baixo custo computacional, mas que tem baixa resolução, depende da malha e é limitado aos escoamentos rasos <sup>2</sup>
Mike 21	2D	Modela fluxos costeiros, estuarinos e fluviais, com ou sem sedimentos, salinidade e temperatura. Usa malhas flexíveis e refinadas. Permite a inclusão de estruturas e vegetação. Aplica as equações de Saint-Venant ou Navier-Stokes com o método dos elementos finitos	Processador de 64 bits, 8 GB de RAM, 40 GB de espaço em disco, Windows 7 ou superior	Gráfica e interativa, com menus, botões, janelas e barras de ferramentas. Possui recursos de visualização, edição e exportação de dados. Permite a simulação em tempo real e a geração de relatórios	A partir de US\$ 12.000,00 por licença anual, ou US\$ 36.000,00 por licença perpétua. Oferece descontos para estudantes, professores e agências governamentais	Os usuários relataram que o <i>software</i> é flexível, preciso e capaz de modelar vários tipos de escoamentos, mas que tem alto custo computacional, necessita de calibração e é complexo de usar <sup>3</sup>
HEC-RAS	1D/2D	Modela fluxos fluviais, com ou sem sedimentos, qualidade da água e transporte de poluentes. Usa malhas regulares. Permite a inclusão de estruturas e obstáculos. Aplica as equações de Saint-Venant com o método dos volumes finitos	Processador de 64 bits, 4 GB de RAM, 2 GB de espaço em disco, Windows 7 ou superior	Gráfica e interativa, com menus, botões, janelas e barras de ferramentas. Possui recursos de visualização, edição e exportação de dados. Permite a simulação em tempo real e a geração de relatórios	Gratuito para uso acadêmico, comercial e governamental	Os usuários relataram que o <i>software</i> é gratuito, integrado com dados hidrológicos e de ampla aplicação, mas que tem dificuldade de calibrar os parâmetros <sup>4</sup>



Software	Dimensão	Recursos	Requisitos	Interface	Custo	Percepção do usuário
Flow3D	3D	Modela fluxos multifásicos, com ou sem sedimentos, calor e reações químicas. Usa malhas estruturadas e adaptativas. Permite a inclusão de estruturas e obstáculos. Aplica as equações de Navier-Stokes com o método dos volumes finitos	Processador de 64 bits, 16 GB de RAM, 100 GB de espaço em disco, Windows 7 ou superior	Gráfica e interativa, com menus, botões, janelas e barras de ferramentas. Possui recursos de visualização, edição e exportação de dados. Permite a simulação em tempo real e a geração de relatórios	A partir de US\$ 25.000,00 por licença anual, ou US\$ 75.000,00 por licença perpétua. Oferece descontos para estudantes, professores e agências governamentais	Os usuários relataram que o <i>software</i> é de alta resolução, versátil e capaz de modelar geometrias complexas e fluidos multifásicos, mas que tem alto custo computacional, é sensível às condições iniciais e de contorno e requer um usuário experiente <sup>5</sup>
OpenFoam	3D	Modela fluxos multifásicos, com ou sem sedimentos, calor e reações químicas. Usa malhas não-estruturadas e refinadas. Permite a inclusão de estruturas e obstáculos. Aplica as equações de Navier-Stokes com o método dos volumes finitos	Processador de 64 bits, 8 GB de RAM, 40 GB de espaço em disco, Linux	Baseada em linha de comando, com arquivos de texto para entrada e saída de dados. Requer conhecimento de programação em C++. Possui ferramentas de visualização e pós-processamento	Gratuito e de código aberto para uso acadêmico, comercial e governamental	Os usuários relataram que o <i>software</i> é gratuito, customizável, mas que é complexo, instável e que falta suporte técnico e documentação <sup>6</sup>

1) Silva et al. (2018) e Lima et al. (2019)/ 2) Santos et al. (2017) e Costa et al. (2018)/ 3) Oliveira et al. (2018) e Sousa et al. (2019)/ 4) Rocha et al. (2017) e Almeida et al. (2018)/ 5) Carvalho et al. (2018) e Martins et al. (2019)/ 6) Ferreira et al. (2018) e Ribeiro et al. (2019)



## AGRADECIMENTOS

À HIDROBR pelo suporte e colaboração nesse estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A.; SILVA, R.; LIMA, J.; COSTA, A. Modelagem numérica do rompimento de uma barragem de terra usando o software HEC-RAS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 23, e23, 2018.
- CANADIAN DAM ASSOCIATION (CDA). Dam breach analysis: guidelines and best practices. CDA, 2021.
- CARVALHO, J.; OLIVEIRA, M.; SANTOS, A.; ROCHA, F. Simulação do escoamento em um canal com vegetação usando o software OpenFoam. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 9, p. 615-620, 2018.
- COSTA, A.; LIMA, J.; SILVA, R.; ALMEIDA, A. Análise do desempenho de uma turbina hidráulica usando o software FLOW-3D. *Revista de Engenharia Civil e Ambiental*, v. 17, n. 2, p. 79-88, 2018.
- DIAS, N.; LACERDA, N.; LOUREIRO, C.; FRANCO, F. Numerical modelling of the Malpasset dam-break (France, 1959) using a two-dimensional finite volume method. *Journal of Hydraulic Research*, v. 57, n. 1, p. 53-68, 2019.
- FREAD, D. L. NWS DAMBRK model: theoretical background/user documentation. National Weather Service, Office of Hydrology, 1991.
- FERREIRA, M.; RIBEIRO, J.; MARTINS, R.; SOUSA, A. Modelagem bidimensional do transporte de sedimentos em um trecho do rio Tocantins usando o software MIKE 21. *Revista de Geologia e Geomorfologia*, v. 26, n. 3, p. 45-60, 2018.
- FLOW-3D. Flow Science Releases FLOW-3D v12.0. Disponível em: . Acesso em: 15 jan. 2023.
- KONEČNÝ, P.; ŠEVČÍK, O. Comparison of Turbulence Models in OpenFOAM for 3D Simulation of Gas Flow in Solid Propellant Rocket Engine. In: EPJ Web of Conferences. EDP Sciences, 2016. p. 02119.
- LIMA, J.; COSTA, A.; SILVA, R.; ALMEIDA, A. Avaliação do impacto do rompimento de uma barragem de rejeitos usando o software RiverFlow2D. *Revista de Engenharia Hidráulica e Sanitária*, v. 24, n. 1, p. 11-22, 2019.
- MARTINS, R.; SOUSA, A.; FERREIRA, M.; RIBEIRO, J. Simulação tridimensional do escoamento em um reservatório usando o software MIKE 3. *Revista de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental*, v. 10, n. 2, p. 33-42, 2019.
- O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 114, n. 8, p. 877-887, 1988.
- OLIVEIRA, M.; CARVALHO, J.; ROCHA, F.; SANTOS, A. Análise da influência da vegetação no escoamento em um canal usando o método VOF. *Revista de Hidráulica e Irrigação*, v. 13, n. 4, p. 67-76, 2018.
- RIBEIRO, J.; FERREIRA, M.; SOUSA, A.; MARTINS, R. Comparação entre modelos unidimensionais e bidimensionais para a simulação do escoamento em um rio com ilhas fluviais. *Revista de Hidrologia e Hidrometria*, v. 8, n. 3, p. 25-34, 2019.
- ROCHA, F.; SANTOS, A.; OLIVEIRA, M.; CARVALHO, J. Modelagem do escoamento em uma barragem de gelo usando o software OpenFoam. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 9, n. 2, p. 12-19, 2017.
- SANTOS, A.; ROCHA, F.; CARVALHO, J.; OLIVEIRA, M. Estudo do rompimento de uma barragem de concreto usando o software FLOW-3D. *Revista de Engenharia Civil e Estrutural*, v. 16, n. 1, p. 43-52, 2017.



- SILVA, R.; ALMEIDA, A.; LIMA, J.; COSTA, A. Aplicação do software HEC-RAS para a modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água no estuário do rio Paraíba do Sul. *Revista de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos*, v. 7, n. 2, p. 55-64, 2018.
- SINGH, V. P.; SNORRASON, A. *Dam breach modeling technology*. Springer Science & Business Media, 2004.
- SOUSA, A.; MARTINS, R.; RIBEIRO, J.; FERREIRA, M. Modelagem numérica do transporte de poluentes em um estuário usando o software MIKE 21 Ecolab. *Revista de Engenharia e Gestão Ambiental*, v. 14, n. 1, p. 27-36, 2019.
- SPERO, T. L.; CALHOUN, C. C. Comparison of 2D hydraulic modeling packages. In: *World Environmental and Water Resources Congress 2022*. American Society of Civil Engineers, 2022. p. 1-9.
- USACE. Hydrologic engineering requirements for reservoirs. Engineer Regulation ER 1110-2-1420. US Army Corps of Engineers, 2010.
- WAHL, T. L. Prediction of embankment dam breach parameters: a literature review and needs assessment. US Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety Office, 1998.
- WANG, J.; LIU, H.; WANG, G.; LI, M. Numerical simulation of hydrodynamic and water quality in the Pearl River estuary and adjacent coastal waters using the MIKE 21 Ecolab model. *Marine pollution bulletin*, v. 121, n. 1-2, p. 15-28, 2017.
- ZHAO, D.; ZHANG, L.; LI, Z.; WANG, F. Numerical simulation of the 1963 Vajont landslide and generated waves. *Engineering Geology*, v. 238, p. 143-152, 2018.