

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE UMA CAIXA DE BERMA PARA DESCIDAS HIDRÁULICAS COM TUBOS

Felipe Campera¹; Cecília Ribeiro²; Sandra Luz³; Robson Santos³; Aloysio Saliba⁴; Juliana Duarte⁵ & Thaisa Xavier⁶.

Abstract: This study presents the hydraulic evaluation of a berm transition box designed for a surface drainage system in steep mining areas. To avoid excavations on slopes and ensure operational safety, surface flow was directed through pipes into energy dissipation boxes. The OpenFOAM® software was used for 3D computational fluid dynamics (CFD) simulations, considering nine structural configurations. The final optimized geometry showed satisfactory performance, with flooding occurring in only 2.5% of the total simulated time, without compromising the berm channel inlets. The results confirm the feasibility of using CFD modeling to analyze non-standard hydraulic structures and highlight the importance of engineering interpretation of multiphase numerical models.

Keywords –Berm transition box; OpenFOAM®; CFD.

Resumo: Este trabalho apresenta a avaliação hidráulica de uma caixa de passagem de berma projetada para integrar um sistema de drenagem superficial em áreas de mineração com alta declividade. Para evitar escavações em taludes e garantir a segurança operacional, foi proposta a condução do escoamento por tubos até caixas dissipadoras de energia. Utilizou-se o software OpenFOAM® para simulações fluidodinâmicas tridimensionais, considerando nove configurações estruturais. A geometria final otimizada apresentou desempenho satisfatório, com afogamento limitado a 2,5% do tempo total simulado e sem comprometimento das entradas dos canais das bermas. Os resultados demonstram a viabilidade do uso de modelagem CFD para analisar estruturas hidráulicas não convencionais e reforçam a necessidade de interpretação crítica dos modelos numéricos multifásicos.

Palavras-Chave – Caixa de berma; OpenFOAM®; CFD.

INTRODUÇÃO

O manejo adequado das águas superficiais é essencial para direcionar de forma eficiente os volumes provenientes das precipitações, independentemente de sua intensidade. Para isso, é indispensável a implantação de estruturas de drenagem projetadas com base em eventos críticos de chuva. No âmbito da mineração, a presença de água acumulada nas cavas pode comprometer a estabilidade geotécnica, dificultar o acesso ao minério e aumentar os custos operacionais comprometer o plano de lavra. Por isso, o Plano Diretor de Drenagem é uma diretriz técnica para a implementação de estruturas de Drenagem Superficial na Mina, no qual é realizada uma análise multidisciplinar dos riscos e necessidades anuais considerando o período chuvoso. Essas estruturas

1) Universidade Federal de Minas Gerais, Doutorando. E-mail: felipe.campera@ufmg.br

2) TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos; Rua Matias Cardoso, 271 – 4 andar, ctourino@tecengenharia.com.br

3) TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos; Rua Matias Cardoso, 271 – 4 andar, rsantos@tecengenharia.com.br

4) TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos; Rua Matias Cardoso, 271 – 4 andar, asaliba@tecengenharia.com.br

5) Anglo American Brasil; Rua Maria Luiza Santiago 200, Belo Horizonte, MG. juliana-duarte@angloamerican-externo.com

6) Anglo American Brasil; Rua Maria Luiza Santiago 200, Belo Horizonte, MG. thaisa.xavier@angloamerican.com

visam o direcionamento adequado da água superficial de chuva, bem como a contenção de sedimentos gerados.

Diferentes soluções para estruturas de drenagem superficial em áreas de mineração são fundamentais para a adaptação a contextos distintos, especialmente em áreas de cavas abertas. Nestes locais, normalmente encontram-se taludes de elevadas declividades, áreas de difícil acesso e requisitos de segurança elevados para a equipe de operação e construção, dado os riscos envolvidos. No estudo de caso analisado, foi necessário desenvolver uma solução alternativa de drenagem superficial que evitasse intervenções por escavação — tanto mecanizada quanto manual — nos taludes, em função das exigências de segurança operacional da atividade. Para isso, foi conduzida uma análise comparativa entre diferentes alternativas de drenagem, considerando o tipo de estrutura, os custos envolvidos e os riscos associados a cada opção.

Nesse sentido, a solução proposta considerou a condução de escoamento superficial por meio de tubos PEAD com caixas de concreto nas bermas, que atuariam na dissipação da alta energia do escoamento da descida. Dessa forma, o objetivo do estudo foi avaliar o funcionamento hidráulico da caixa de berma proposta, diante da alta declividade do talude.

O software utilizado para o desenvolvimento dos trabalhos de modelagem fluidodinâmica computacional (CFD) foi o OpenFOAM®, versão 8. Trata-se de um ambiente amplamente utilizado nas áreas de hidráulica, termodinâmica, eletromagnetismo, hidrogeologia e diversas variações, disponibilizado pela OpenFoam Foundation como código livre através de General Public License (GPL).

O modelo OpenFOAM® foi criado por Henry Weller em 1989 sob o nome de “FOAM” e foi lançado como código aberto denominado “OpenFOAM” também por Henry Weller, Chris Greenshields e Mattijs Janssens em dezembro de 2004. Desde então, o modelo continuou a ser gerenciado e desenvolvido mundialmente com novas versões sendo lançadas anualmente aos usuários. A versão corrente é a 12, contudo, considerou-se a versão 8 consolidada para o desenvolvimento desse trabalho.

SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA TRIDIMENSIONAL

O programa escolhido trabalha com a discretização numérica pelo Método dos Volumes Finitos, a partir das equações de Navier-Stokes (Equação 1), a mesma metodologia de funcionamento de outros softwares similares como Flow-3D®, desenvolvido pela Flow Science Inc.

$$-\nabla P + \mu \nabla^2 V + pg = \rho \frac{DV}{Dt} \quad (1)$$

na qual ∇P é o gradiente da pressão; μ a viscosidade do fluido; ∇^2 o operador laplaciano; V o vetor de velocidade; e pg é a força gravitacional.

O módulo de escoamentos do OpenFOAM® é um ambiente que permite a modelagem hidráulica dos campos de pressão, profundidade e velocidade do escoamento em todas as direções (3D), tornando possível a avaliação dos efeitos decorrentes de fluxos perpendiculares e transversais à direção principal do escoamento, bem como da aceleração vertical, turbulência, perda de carga e outras perturbações do fluxo em transições horizontais e verticais, sejam elas bruscas ou graduais.

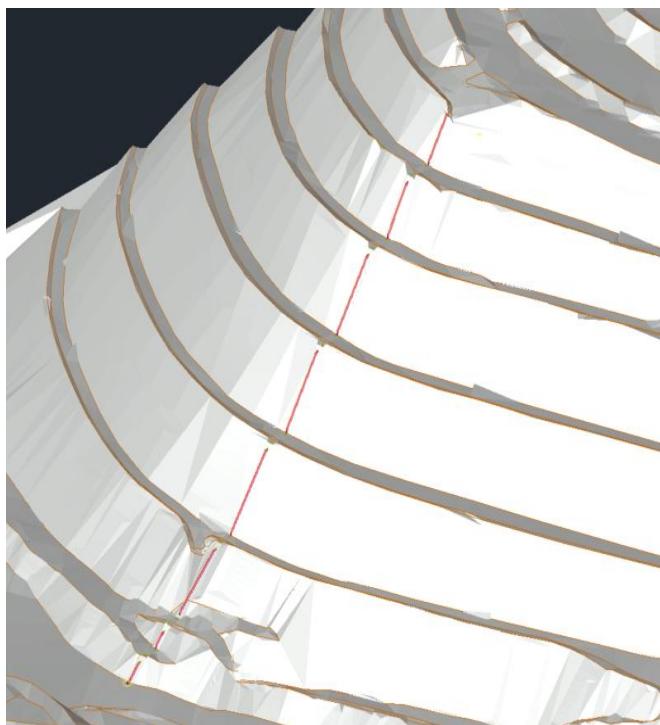
A oscilação entre regimes laminares e turbulentos, vorticidade, tensões tangenciais que se desenvolvem no contato entre sólido e fluido, descolamento da veia líquida e cavitação são exemplos de problemas típicos que podem ser avaliados detalhadamente por meio da aplicação desse tipo de modelagem hidráulica avançada, tornando-a adequada para análise de desempenho de estruturas

hidráulicas, principalmente aquelas não comumente definidas por equações convencionais (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2015).

DESCIDA PROPOSTA

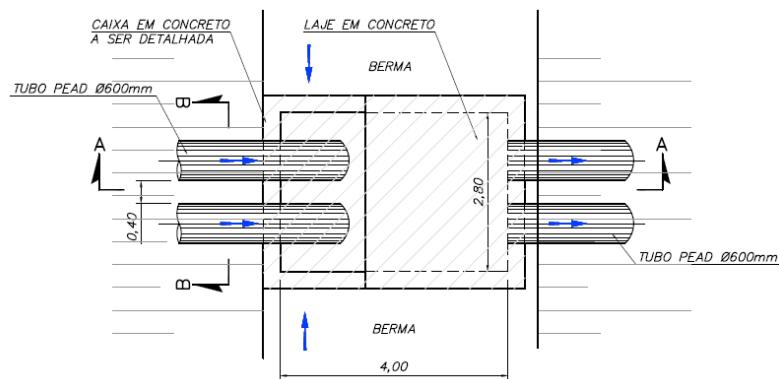
A representação do talude que foi proposta a descida é apresentada na Figura 1.

Figura 1: Representação do talude que será implementada a descida em tubo PEAD.



A descida proposta é composta por dois tubos de 0,60 m nos trechos de taludes, conectados às caixas de berma de 4,0 m de comprimento, 2,8 m de largura e 2,0 m de altura, conforme mostrado na Figura 2. Os taludes da descida apresentam declividade variável de 0,82 m/m e 1,19 m/m. A dimensão do comprimento da caixa foi definida para atender o comprimento da menor berma da descida.

Figura 2: Seção típica da conexão entre os trechos em tubo e a caixa de berma.



O dimensionamento das caixas de bermas foi conduzido com auxílio de modelagem hidrodinâmica tridimensional com resultados descritos a seguir.

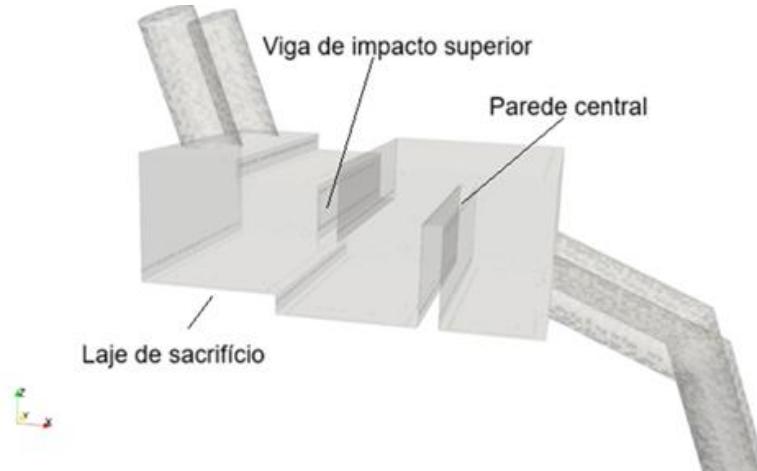
GEOMETRIA DO MODELO 3D

Devido à natureza de altas velocidades teóricas alcançadas pelo escoamento na descida, optou-se por avaliar o comportamento hidráulico das caixas das bermas por meio de modelagem tridimensional, uma vez que a predição do escoamento bruscamente variado nessas caixas é limitada com os recursos de equações clássicas disponíveis na literatura.

A geometria de entrada no modelo tridimensional constitui-se do sólido elaborado a partir dos detalhes geométricos. A extensão gerada para leitura do arquivo pelo OpenFOAM® é “.stl”, que representa a litografia da superfície em estudo.

Foram realizadas nove simulações intermediárias, considerando variações na posição e altura da parede central, na viga de impacto superior e nas dimensões da laje de sacrifício. A Figura 3 apresenta a caixa em análise, destacando os elementos que sofreram variação nos diferentes cenários simulados nesse trabalho de otimização da estrutura hidráulica, visando à dissipação de energia sem, contudo, provocar o afogamento total da caixa, que atua como um dispositivo de desconexão hidráulica em relação aos canais das bermas.

Figura 3 - Geometria geral da caixa em análise e as estruturas de variação estudadas nesse trabalho de otimização da estrutura hidráulica



A Figura 4 apresenta o arranjo geométrico geral simulado, com finalidade de criar as melhores condições de entrada e saída para a caixa em análise (segunda caixa da figura), evitando-se interferências pelas condições de contorno.

Figura 4 - Arranjo geométrico simulado – variações testadas para otimização.

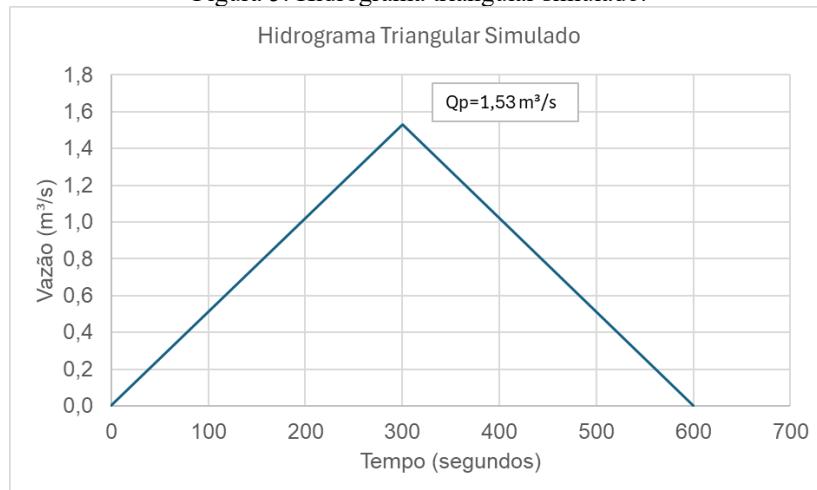


DOMÍNIO DA SIMULAÇÃO

O modelo tridimensional (domínio) preparado para as simulações abrange uma área de $47,8 \text{ m}^2$, incluindo tubulações e duas sequências de caixas. Como condições de contorno, adotaram-se:

- A montante: foi considerada a entrada de vazão a partir do hidrograma triangular apresentado na Figura 5, distribuída na área molhada das tubulações mais a montante. Devido à necessidade de reprodução das condições hidráulicas transitórias entre as caixas, optou-se por coletar os resultados na segunda caixa da sequência, por se tratar de uma porção isenta de influências hidráulicas causadas pelas condições de contorno.

Figura 5: Hidrograma triangular simulado.



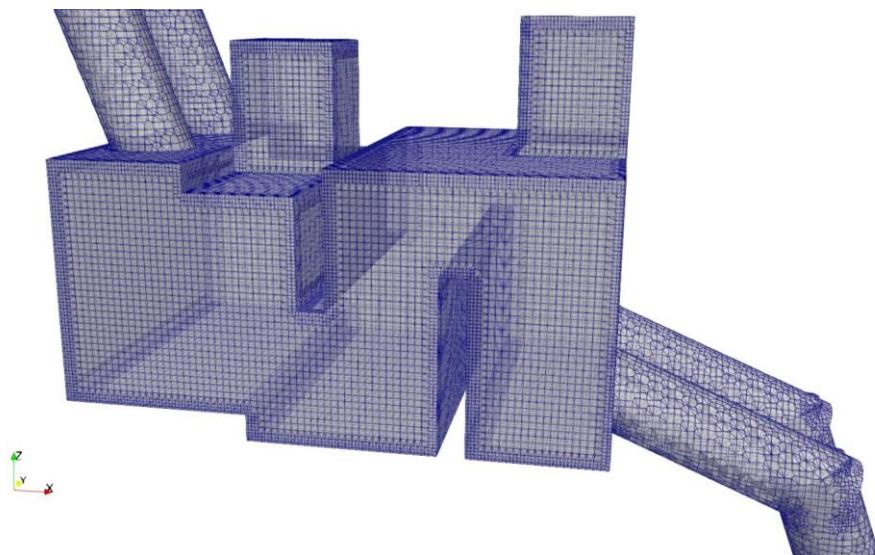
- A jusante: considerou-se que o escoamento a jusante não exerce influência sobre as seções de montante, sendo adotada a condição de saída livre, tanto para “fase água” quanto para “fase ar” da simulação bifásica, na região da área molhada das duas tubulações mais a jusante. A desconexão hidráulica na sequência de caixas simuladas, com a coleta dos resultados na segunda caixa permite tal condição de saída na última unidade.

MALHA DE CÁLCULO

O modelo completo foi composto por 522.614 células. Considerou-se uma discretização dos elementos tridimensionais hexaédricos conforme descrito a seguir e na Figura 6:

- Refinamento Global (x,y,z): 0,05 m;
- Entrada do Modelo (Inlet - x,y,z): 0,025 m;
- Superfícies de contato com concreto, como na região de degraus (x,y,z): 0,0025 m;
- Saída do Modelo (Outlet - x,y,z): 0,025 m;

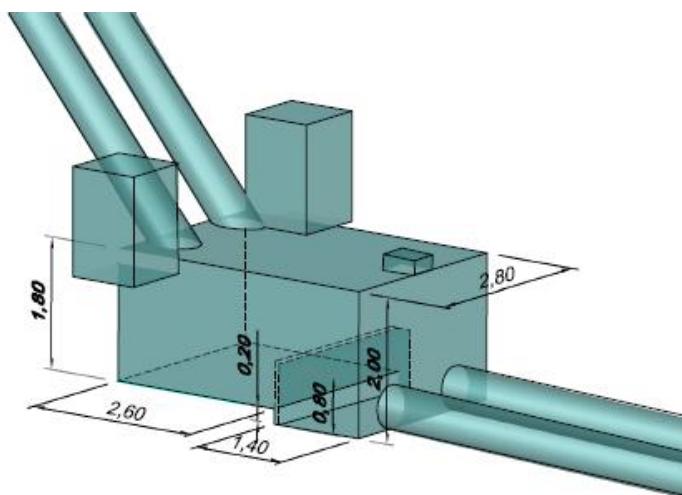
Figura 6: Malha Hexaédrica – Exemplo de tratamento multidirecional da malha.



RESULTADOS

Como foram executadas nove simulações com o objetivo de otimizar a estrutura, os resultados apresentados referem-se à última configuração testada, em relação as variáveis apresentadas no item de GEOMETRIA DO MODELO 3D. Na Figura 7 é apresentado o arranjo individual considerando a remoção da viga superior, de modo a evitar o afogamento da porção influenciada pelos canais das bermas, além do ajuste da posição e altura da parede central e da laje de sacrifício.

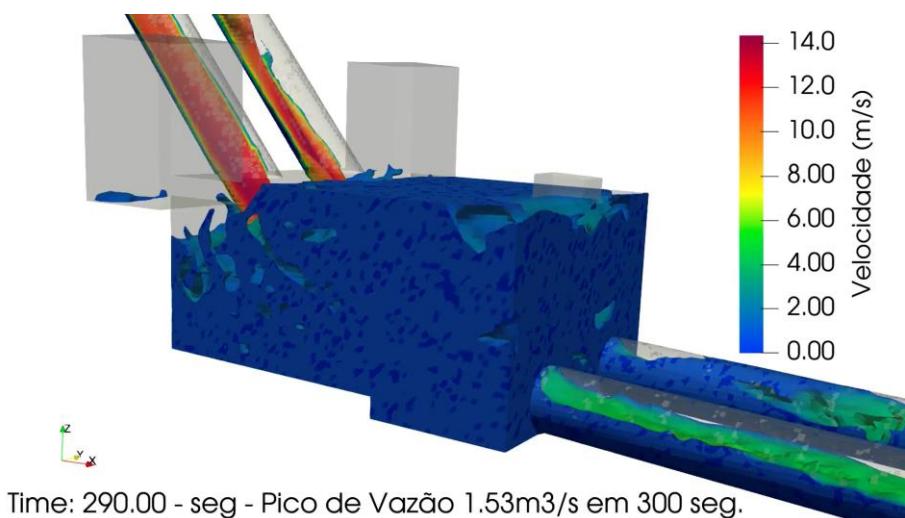
Figura 7: Geometria final otimizada



Foram simulados 600 segundos para a configuração final, levando-se em conta o tempo de base do hidrograma triangular apresentado pela Figura 5. A situação mais crítica na segunda caixa foi observada aos 290s de simulação, com duração máxima de apenas 15s. Assim, a situação de afogamento na porção a jusante da caixa corresponde a apenas 2,5% do tempo total simulado para o evento de projeto, mantendo-se livres as entradas dos canais das bermas, sendo este um requisito de projeto. Essa condição crítica ocorre apenas para a última caixa da descida próximo ao sump, para a vazão de projeto. Neste ponto, a vazão escoada para as bermas corresponderia a $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, que se dividiria nas duas direções da berma. O valor permanece dentro da capacidade de escoamento da berma, sem comprometimento da estrutura.

A Figura 8 apresenta a situação máxima descrita para o instante 290s, com comportamento hidráulico de duração máxima de 15s.

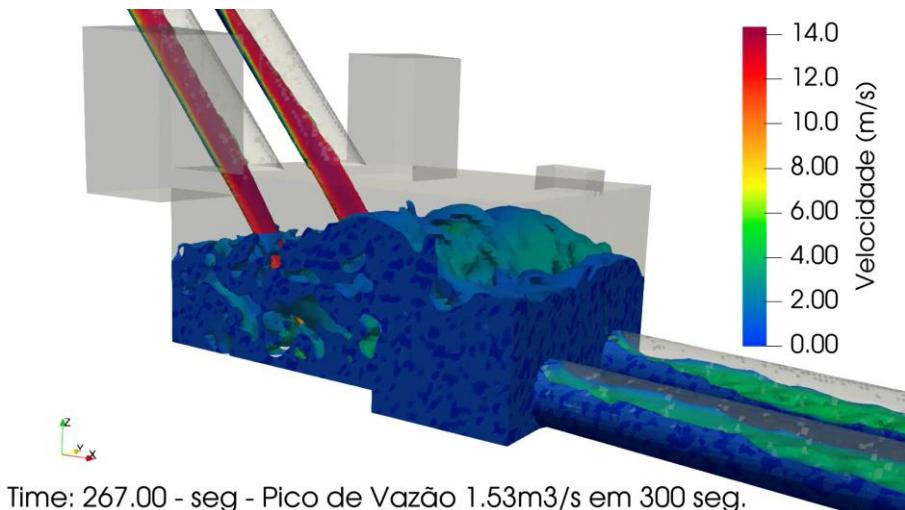
Figura 8 – Situação máxima descrita para o instante 290 segundos, com duração máxima de 15 segundos.



Como critério quantitativo foi avaliada a integração da pressão do fluxo nos 15s de contanto com a tampa para auxiliar o projeto estrutural da caixa. Chegou-se a um carregamento médio de 450 kgf/m² (4.415 N/m²), no referido intervalo de tempo.

Por sua vez, em 97,5% do tempo a caixa mantém o funcionamento ordinário (não afogada), conforme apresentado pela Figura 9.

Figura 9 - Caixa - funcionamento ordinário (não afogado) em 97,5% do tempo simulado de 600s (Hidrograma de projeto).



CONCLUSÕES

Para a avaliação hidráulica de uma caixa de passagem de berma para uma descida de tubos foram realizadas nove modelagens fluidodinâmicas tridimensionais CFD.

Após o processo de otimização foi definida uma geometria ajustada, com a remoção da viga de impacto superior, o reposicionamento e ajuste da altura da parede central, além do ajuste da laje de sacrifício.

Foram simulados 600s com base no hidrograma triangular. A condição mais crítica ocorreu na segunda caixa aos 290s, com duração de apenas 15s, ou seja, em apenas 2,5% do tempo total simulado. Nessa situação, houve afogamento da caixa, mas sem a obstrução das entradas dos canais das bermas, conforme exigido no projeto. O ponto crítico ocorreu apenas para a vazão de projeto da última caixa, próxima ao sump. Nesse ponto, parte da vazão retorna para as bermas, com um escoamento estimado em 0,04 m³/s, que se dividiria nas duas direções da berma. Esse valor está dentro da capacidade de escoamento das bermas, não comprometendo, portanto, a integridade da estrutura.

Por fim, destaca-se que as modelagens tridimensionais representam atualmente o recurso mais avançado para a verificação hidráulica de estruturas de engenharia. Seu uso é especialmente relevante em cenários de carência de equacionamento clássico preditivo do comportamento hidráulico de determinada estrutura, ou quando a modelagem física do processo se mostra inviável. Contudo, é importante reconhecer que todos os modelos multifásicos numéricos apresentam incertezas, sobretudo relacionadas ao processo natural de incorporação de ar à fase de água e à dissipação da energia cinética turbulenta (k), atribuída ao modelo de turbulência $k-\omega$ (Grupo RANS – *Reynolds Averaged Navier Stokes*) e empregado neste estudo. Portanto, recomenda-se a interpretação dos resultados apresentados com critério técnico e parcimônia.

REFERÊNCIAS

BRUNETTI, F. Mecânica dos Fluidos - 2^a ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 431p.

CHANSON, Hubert. *The hydraulics of open channel flow: an introduction*. 2. ed. Oxford, UK: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. *The finite volume method in computational fluid dynamics*. 1. ed. Switzerland: Springer, 2015.

OPENFOAM FOUNDATION. *OpenFOAM User Guide version 8*. [S.l: s.n..]. Disponível em: <<https://openfoam.org>>, 2020.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Corps of Engineers hydraulic design criteria: Volume 2*. [S.l.] U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1977. Disponível em: <./././U/US_ARMY_Corps_of_Engineers_1987_hydraulic_design_criteria.pdf T4 - Volume 1>.

AGRADECIMENTOS

AGRADECIMENTOS à Anglo American pela disponibilização dos dados e pelo suporte técnico prestado ao longo do desenvolvimento deste trabalho. A realização deste estudo só foi possível graças à colaboração e à confiança depositada pela empresa, que fomentou a busca por soluções técnicas aplicáveis à sua realidade operacional.