

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

MODELAGEM FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) DO MODELO REDUZIDO DO RESERVATÓRIO DA PCH SALTO DO PARAOPEBA

Natália Melo da Silva¹ ; Edna Maria de Faria Viana² & Jorge Luis Zegarra Tarqui³

Abstract: This study applies three-dimensional computational fluid dynamics (3D CFD) modeling to analyze hydrodynamics and sediment transport in the Salto Paraopeba SHP reservoir, in Jeceaba/MG, decommissioned due to intake siltation. FLOW-3D software was used and verified with velocity data from a physical scale model built at the Hydraulic and Water Resources Research Center (CPH) of UFMG. The clean reservoir model showed good agreement with the discharge curve from the physical model, with bed roughness height being key for calibration. In the sediment transport simulation, beach formation at the reservoir's end resembled that in the physical model, validating the use of the Meyer-Peter and Müller equation. Numerical results matched experimental observations, confirming the reliability of the modeling approach. This study demonstrated the effectiveness of physical models in validating computational models and highlighted limitations of this type of analysis.

Keywords – Sediment transport, physical model, Small Hydroelectric Power Plant

Resumo: Este artigo utiliza a modelagem computacional tridimensional (CFD 3D) para analisar a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos no reservatório da PCH Salto Paraopeba, em Jeceaba/MG, desativada devido ao assoreamento da tomada d'água. Utilizou-se o software FLOW3D, verificado com base em medidas de velocidade obtidas no modelo físico reduzido construído no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (CPH) da UFMG. O modelo hidráulico do reservatório limpo apresentou boa concordância com a curva de descarga medida no modelo físico, sendo a altura de rugosidade do leito um parâmetro importante para a calibração. Na simulação do transporte de sedimentos, a formação da praia ao final do reservatório foi semelhante à observada no modelo físico, validando a aplicação da equação de Meyer-Peter e Müller. Os resultados numéricos se aproximaram das observações experimentais, evidenciando a confiabilidade da caracterização adotada. O estudo demonstrou a eficiência do uso de modelo físico na validação do modelo computacional, além de apontar limitações desse tipo de abordagem.

Palavras-Chave – Transporte de sedimentos. Modelo físico. Pequena Central Hidrelétrica

1) Mestre no Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais - Avenida Antônio Carlos, 6627 - CEP 31270-901- Minas Gerais, MG – Brasil. Fone: 31 993615187, E-mail: nataliamelo1211@gmail.com

2) Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais - Avenida Antônio Carlos, 6627 - CEP 31270-901- Minas Gerais, MG – Brasil. Fone: 31 3409-4925, E-mail: jlztarqui@yahoo.com.br

3) Professora do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais - Avenida Antônio Carlos, 6627 - CEP 31270-901- Minas Gerais, MG – Brasil. Fone: 31 3409-4821, E-mail: ednamfv@ufmg.br

INTRODUÇÃO

A repotenciação de usinas hidrelétricas desativadas ou com baixo potencial de geração é uma opção atraente diante da crescente demanda por energia elétrica. Oliveira, Oliveira e Miranda (2022) apresentam um método para estimar os benefícios dessa repotenciação, demonstrando sua viabilidade em uma central hidrelétrica. No entanto, o assoreamento de reservatórios representa um desafio significativo para a sustentabilidade da geração hidrelétrica no Brasil, especialmente para Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), que ocupam um lugar importante na matriz energética do país.

Portanto, é crucial desenvolver projetos de PCHs que minimizem os impactos do assoreamento. A vida útil de um reservatório está diretamente ligada à viabilidade econômica e à capacidade de gerenciamento eficiente dos sedimentos. Nas PCHs, o acúmulo de sedimentos pode reduzir significativamente sua vida útil, aumentando os custos de manutenção e diminuindo a capacidade operacional. Estudos indicam que a perda anual de capacidade de armazenamento dos reservatórios no Brasil pode superar 1%, como estimado por Miranda (2011) e Soares (2015).

Para otimizar projetos e intervenções em PCHs, é essencial estudar a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos em seus reservatórios, conforme destacado por Carvalho (2008). No entanto, a complexidade do problema exige abordagens que conciliem precisão e viabilidade prática. Métodos empíricos, como o de Borland & Miller (1958), podem ser utilizados, mas apresentam limitações. Por isso, a modelagem física e numérica tem ganhado destaque como ferramentas complementares para simular o comportamento hidráulico e sedimentológico em escala reduzida e extrapolar os resultados ao protótipo.

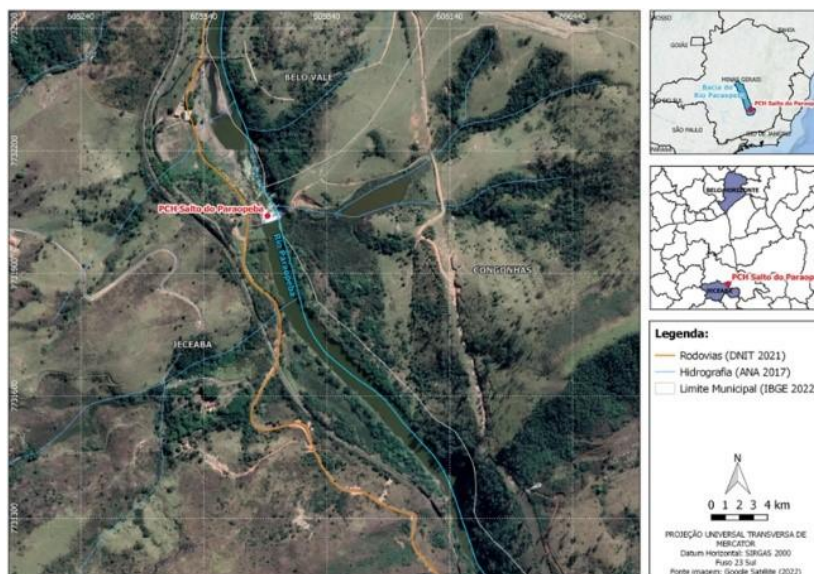
Este estudo propõe o uso de modelagem física e CFD-3D para investigar a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos em escala reduzida, com base no reservatório da PCH Salto do Paraopeba, localizada em Jeceaba–MG. O modelo foi construído no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (CPH) da UFMG, e dados experimentais de velocidade e nível d'água foram utilizados para validar o modelo numérico, com vistas à análise de padrões de escoamento e potenciais zonas de deposição e erosão.

MATERIAIS E MÉTODOS

Descrição da área de estudo

A PCH Salto do Paraopeba, localizada próxima à cidade de Jeceaba, Minas Gerais, conforme Figura 1, foi selecionada para avaliar a eficiência de um modelo numérico tridimensional no transporte de sedimentos em reservatórios a fio d'água. Construída entre 1950 e 1956, possui duas unidades de geração com potência nominal de 2,46 MW. Apesar das reformas realizadas em 2001 pela CEMIG, a usina enfrentou paralisações devido à constante chegada de sedimentos, levando à acumulação de entulhos na entrada do circuito de geração e do vertedor. Desde 2006, a usina não opera, e um processo de reabilitação iniciado em 2016 encontra-se paralisado.

Figura 1 – Mapa de localização da PCH Salto do Paraopeba (imagem do Google Satélite, 2023)

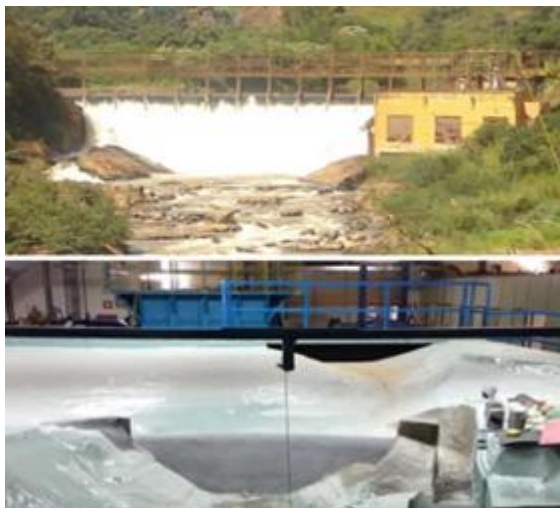


Modelo físico reduzido da PCH Salto do Paraopeba

O modelo físico reduzido da PCH Salto do Paraopeba foi construído com base em dados topográficos e batimétricos fornecidos pela CEMIG, utilizando fibra de vidro, poliestireno e argamassa. A escala do modelo é de 1:40 e capacidade de recalque de 300 m³/h. A partir da Figura 2 é possível verificar a vista por jusante da PCH Salto Paraopeba em 2014 e do respectivo modelo reduzido construído no CPH. A concepção seguiu os princípios de semelhança geométrica, cinemática e dinâmica, conforme Julien (2002), priorizando a similitude de Froude, adequada para escoamentos em canais com superfície livre. A distorção entre escalas horizontal e vertical foi minimizada para garantir a representatividade das condições de escoamento e transporte de sedimentos.

A velocidade no modelo reduzido foi avaliada por Campos (2018) usando um velocímetro acústico Doppler (ADV), considerando grade com espaçamento de 10 cm na horizontal e 5 cm na vertical, com média de 500 medições por ponto. Testaram-se regimes subcrítico ($Fr < 1$) e supercrítico ($Fr > 1$).

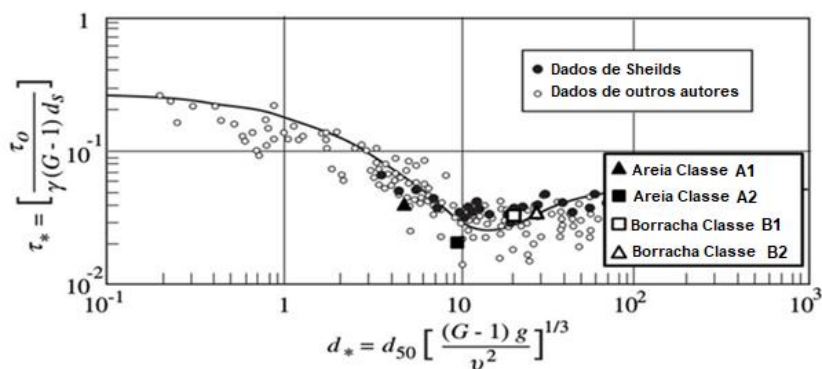
Figura 2 – PCH Salto do Paraopeba em 2014 e modelo reduzido (Campos, 2018)



Para simular os processos de assoreamento, utilizaram-se 300 L de borracha moída (2–3 mm), inseridos junto à entrada do modelo sob vazão de 50,5 m³/h durante 1 hora, até a formação de uma praia estável, em equilíbrio entre entrada e saída de sedimentos. A escolha desse material baseou-se em Campello (2017), que identificou predominância de areia muito fina, fina e média no reservatório, e em testes do CPH (2023) que comprovaram o comportamento hidráulico semelhante da borracha à areia natural, conforme Figura 3, além de seu baixo custo e fácil obtenção.

A similitude no transporte sedimentar considerou o parâmetro de Shields e o diâmetro adimensional do grão, buscando representar com fidelidade os processos de movimentação e deposição observados no protótipo. Embora nem todos os critérios de semelhança possam ser atendidos simultaneamente em modelos reduzidos, o foco nas forças gravitacionais predominantes e o controle de distorções geométricas asseguram boa representatividade do sistema real, especialmente para estudos de escoamento e deposição.

Figura 3 – Tensões críticas de Shields experimental da borracha em relação a curva de Shields modificada para massa específica igual a 1140 kg/m³ (Adaptado de CPH, 2023)



Onde: B1: classe granulométrica da borracha de 2,00 a 1,70 mm,

B2: borracha de 3,00 a 2,00 mm,

A1: areia de 0,125 mm a 0,250 mm,

A2: areia de 0,250 a 0,500mm.

Modelo Numérico Computacional

O estudo do transporte de sedimentos no modelo reduzido da PCH Salto Paraopeba utilizou o modelo computacional tridimensional FLOW-3D HYDRO® da FlowScience, cuja licença foi concedida à UFMG para fins educacionais. Este modelo é baseado no Método dos Volumes Finitos para resolver as equações de Navier-Stokes. As premissas e critérios adotados incluíram a realização da simulação em ambiente 3D, definição das alturas de rugosidade e parâmetros obtidos para a borracha na representação dos sedimentos. A geometria foi gerada a partir da topografia em escala de 1:40 usando o software AutoCad Civil 3D e exportada para o formato .stl compatível com o FLOW-3D HYDRO. Não foi necessária a implementação da casa de força, pois a área de interesse limitava-se ao reservatório a montante do barramento.

O software FLOW-3D HYDRO utiliza malhas ortogonais estruturadas que interagem com geometrias por meio do método FAVOR™, permitindo definições independentes de malha e geometria. No estudo em questão, a malha foi definida para representar apenas a área de interesse: o

reservatório a montante da barragem, visando analisar os campos de velocidade e transporte de sedimentos nessa região. Os seguintes cenários de simulação foram estabelecidos:

- Cenário 1: cheias ordinárias ($TR = 1,01$ anos; $Q = 50,5 \text{ m}^3/\text{h}$) e reservatório limpo;
- Cenário 2: vazões de cheias ($TR \sim 5$ anos; $Q = 275 \text{ m}^3/\text{h}$) e reservatório limpo;
- Cenário 3: cheias ordinárias ($TR = 1,01$ anos; $Q = 50,5 \text{ m}^3/\text{h}$) e reservatório assoreado.

A calibração do modelo FLOW-3D HYDRO® foi realizada a partir da curva de descarga obtida no modelo físico reduzido da PCH Salto do Paraopeba, operado em condições de reservatório limpo. Foram consideradas duas vazões de referência: $50,5 \text{ m}^3/\text{h}$ (Cenário 1) e $275,0 \text{ m}^3/\text{h}$ (Cenário 2), associadas a regimes subcrítico e supercrítico, respectivamente. Com base no trabalho de Campos (2018), que determinou coeficientes de rugosidade de Manning ($n = 0,012, 0,018$ e $0,030$) por meio de simulações bidimensionais no HEC-RAS, realizou-se a conversão desses valores em alturas de rugosidade (K_s), conforme as equações de correspondência do FLOW-3D. Adicionalmente, foi testado o valor de $n = 0,040$, comum em superfícies com revestimentos mais ásperos, visando maior aderência à curva de descarga observada. As simulações computacionais foram conduzidas até 30 segundos, quando o escoamento se estabilizava (a partir de ~ 25 segundos). A visualização dos padrões de fluxo foi feita em diferentes planos (horizontal, longitudinal e vertical), facilitando a comparação entre cenários e valores de rugosidade.

Para o transporte de sedimentos, o parâmetro crítico de Shields foi estabelecido em $0,035$, com o cálculo da descarga de sedimentos realizado através da Equação de Meyer Peter & Muller. A fração de sedimentos incluiu duas frações, com diâmetros de $0,002 \text{ m}$ e $0,003 \text{ m}$, respectivamente, em proporção igual. O peso específico dos grãos foi determinado experimentalmente como 1140 kg/m^3 , enquanto o ângulo de repouso foi fixado em 32° . A condição inicial de sedimentos no fundo foi estabelecida próximo ao obtido experimentalmente, sem entrada adicional de sedimentos suspensos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A curva de descarga associada às simulações realizadas com $K_s = 0,19$ está representada na Figura 4, sendo esta escolhida para dar continuidade às simulações no modelo computacional de transporte de sedimentos, uma vez que apresenta uma proximidade considerada satisfatória com a curva medida em termos gerais e cujas métricas de erro calculadas indicaram valores baixos, conforme Tabela 1, o que indica boa calibração do modelo, já que tais métricas medem a discrepância entre os dados simulados e os observados: quanto menores seus valores, melhor o ajuste.

Figura 4 – Curva de descarga medida no reservatório do modelo reduzido x curva obtida na simulação

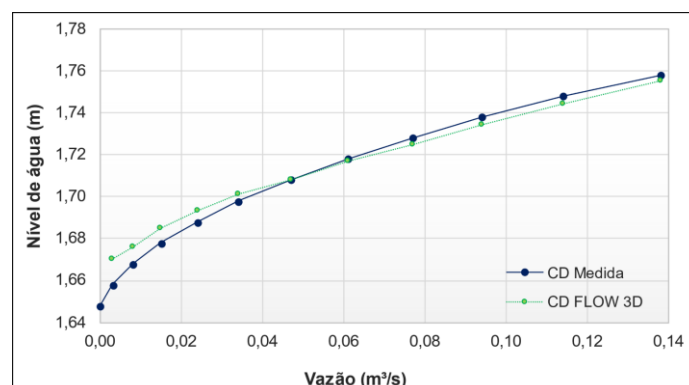


Tabela 1 – Postos pluviométricos utilizados

Altura da rugosidade	MAE	MSE	RMSE	MAPE (%)
Ks: 0,190	0,0045	0,000031	0,0056	0,0027

*MAE: erro absoluto médio; MSE: erro quadrático médio; RMSE: raiz do erro quadrático médio e MAPE: erro percentual absoluto médio.

O padrão de escoamento para a vazão de 50,5 m³/h (Cenário 1) e para a vazão de 275,0 m³/h (Cenário 2) é verificado nas Figura 5 e Figura 6, respectivamente. Se observa na Figura 5 a formação de vórtices nas laterais do barramento, especialmente no canal de aproximação, onde as velocidades são mais baixas, indicando possíveis zonas de estagnação nessas regiões. Esses vórtices estão destacados com setas brancas na imagem à direita, que apresenta a direção do escoamento sobreposta ao campo de velocidades.

Figura 5 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,19 – Vazão 50,5 m³/h

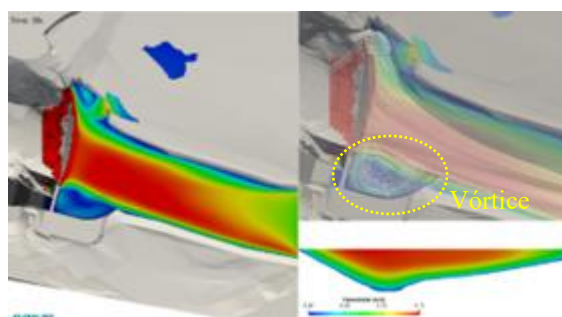
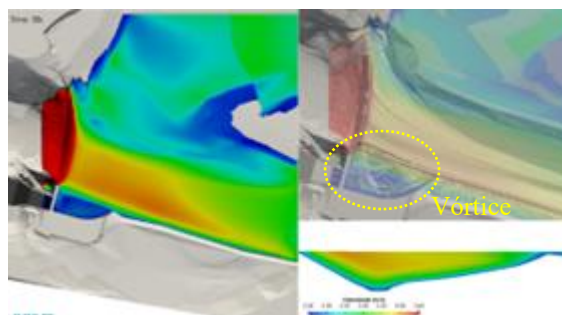


Figura 6 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,19 – Vazão 275,0 m³/h

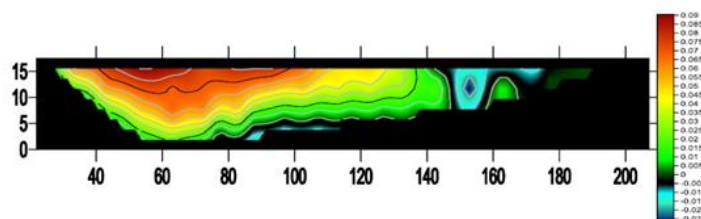


A área ocupada pelo fluido é ampliada, como se observa na Figura 6, devido à vazão mais elevada em relação ao Cenário 1, apresentado anteriormente. Ainda é perceptível a formação de vórtices no canal de aproximação, de maneira menos evidente.

Análise de velocidade na seção do reservatório

Para verificação das simulações, foi selecionada uma seção fluvial localizada ao centro do reservatório para comparação do perfil de velocidade com o obtido nesta mesma seção por meio da interpolação das medições no modelo reduzido, Figura 7.

Figura 7 – Velocidade na seção de análise – Cenário 1 – Vazão 50,5m³/h



a. Interpolação dos valores medidos (Campos, 2018).

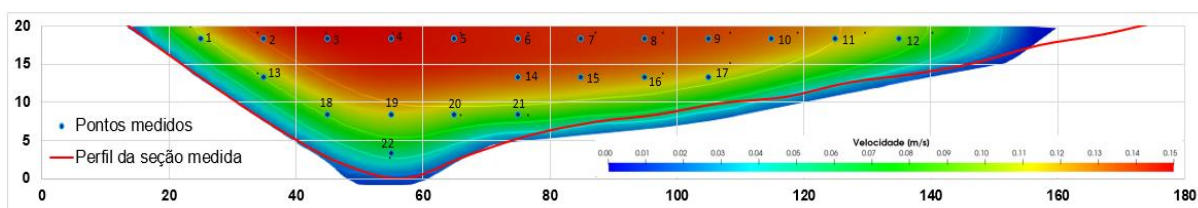


b. Velocidades obtidas no modelo FLOW-3D HYDRO

A similaridade no padrão de escoamento é perceptível na Figura 8, apesar da limitação da visualização devido à escala gráfica ser diferente. A seção do modelo exibe uma distribuição de velocidades um tanto mais uniforme. Na seção medida, observa-se um padrão discrepante de velocidades a partir da distância 140, onde são verificadas velocidades extremamente baixas, nulas e negativas, inferindo-se que o escoamento nessa região pode ocorrer na direção oposta (região de recirculações).

Para uma análise detalhada das velocidades, foi selecionada uma seção situada aproximadamente no centro do reservatório, considerando o Cenário 1 (50,5 m³/s). Através das velocidades medidas em pontos específicos nesta seção, realizou-se uma aproximação da localização desses pontos na seção simulada para a comparação dos valores de velocidade, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Comparação entre os pontos medidos e simulados



Os resultados de velocidade média no modelo computacional superam em cerca de 33% a 70% os medidos. O modelo em questão tende a superestimar as velocidades, o que pode não refletir com precisão a realidade. Isso ressalta a importância contínua da realização de monitoramentos para uma compreensão mais fiel e ajustada das condições.

Além disso, é necessário compreender que as medidas realizadas com o ADV possuem uma flutuação. Para as maiores medidas em x a flutuação gira em torno de 10 a 15 % do valor médio nas regiões de maiores velocidades, mas nas medidas em y e z, por possuírem valores menores, ficam em torno de 100%. Além disso, sabe-se que quanto menor o valor da velocidade medida no ADV maior será a flutuação em torno da média. Como os valores de velocidades no modelo reduzido são baixos, isso pode ter influenciado.

Transporte de sedimentos no reservatório – Cenário 3

A simulação de transporte de sedimentos foi conduzida com uma vazão constante de 50,5 m³/h, utilizando uma altura de rugosidade igual a 0,19, ao longo de 3600 segundos (1 hora). Este procedimento replicou as condições experimentais do trabalho de Campos (2018) para estabelecer a configuração de uma praia estável de sedimentos. Para a simulação, foi criado um componente de geometria para representar a região de sedimentos compactados (Packed Sediment) com um volume de 300 litros, replicando o volume de borracha previamente disposto no modelo reduzido. A

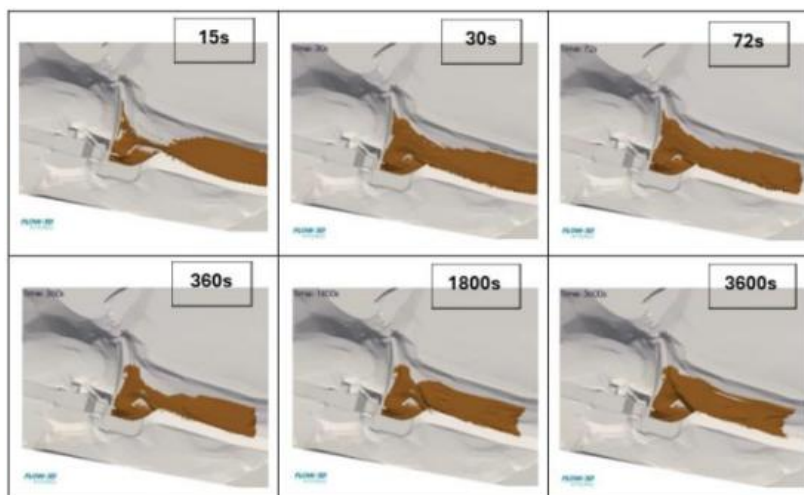
configuração final da praia obtida pela simulação pode ser verificada no tempo de 3600 segundos, podendo ser comparada à geometria final obtida no experimento, conforme Figura 9.

Figura 9 – Geometria de praia obtida ao final da simulação no modelo físico reduzido (Campos 2018)



A Figura 10 apresenta intervalos temporais dos resultados da simulação de transporte de sedimentos, especificamente quanto à movimentação do sedimento compactado. A partir desta, se observa uma rápida movimentação do sedimento em direção ao canal de aproximação e na parte inferior do vertedouro em 15 segundos, como indicado pela perspectiva da figura em z. Contudo, esse espaço é quase completamente preenchido com sedimento até os 30 segundos. Posteriormente, a massa de sedimento na entrada do reservatório continua a se deslocar em direção ao barramento, formando uma região vazia nesse trecho inicial do reservatório a partir de 72 segundos. Outra região vazia se forma na entrada do canal de aproximação, onde o terreno é um pouco mais elevado. A partir do balanço de massa realizado no modelo, obteve-se uma perda de 2% de sedimentos no reservatório. O volume inicial o componente sólido verificado foi de 300 litros, com uma massa inicial de 219,40 kg. Ao final da simulação, o volume foi de 295 litros, com uma massa final de 214,56 kg.

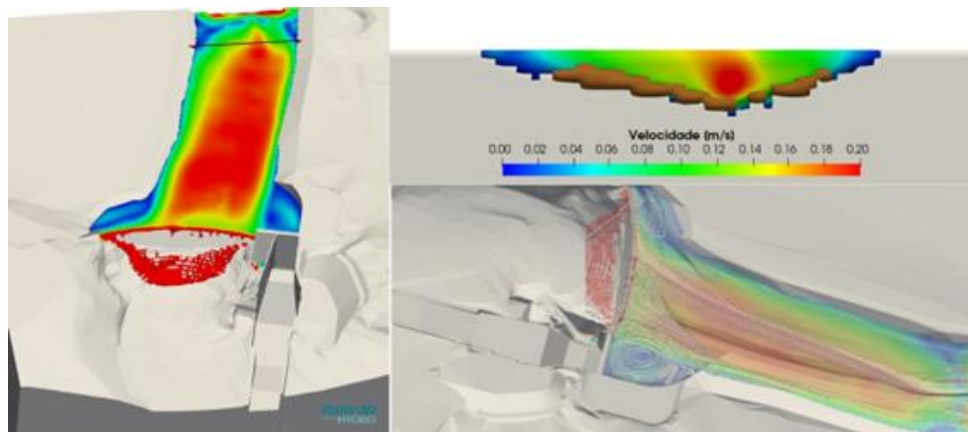
Figura 10 – Recorte temporal dos resultados da movimentação do sedimento compactado



De maneira geral, o resultado simulado (Figura 10) se aproxima do obtido no modelo experimental (Figura 9). Observa-se a congruência entre as regiões vazias, próximo ao canal de aproximação, onde a topografia é mais elevada, bem como antes do alargamento do reservatório, na parte esquerda, onde o sedimento se movimentou, deixando esse espaço vazio.

A Figura 11 exibe o resultado de velocidade (m/s), para a condição de reservatório assoreado, ao final dos 3600 segundos de simulação.

Figura 11 – Padrão de velocidade obtido ao final da simulação de transporte de sedimentos



Nota-se que o padrão de escoamento sofreu algumas alterações devido à presença dos sedimentos. De maneira mais evidente, percebe-se uma diferença no padrão de escoamento na entrada do reservatório, onde a massa de sedimentos se movimentou mais intensamente. Nesta seção, observa-se uma região central com velocidades mais altas, se aproximando de uma forma circular.

CONCLUSÕES

O estudo realizado utilizando o software FLOW-3D considerou diferentes cenários para simular o comportamento hidráulico e o transporte de sedimentos na PCH Salto Paraopeba. No primeiro cenário, com o reservatório limpo e vazão de 50,5 m³/h, as curvas de descarga obtidas no modelo numérico se aproximaram daquelas medidas no modelo reduzido, especialmente quando a altura de rugosidade foi definida como 0,19. Observou-se a formação de vórtices nas laterais do barramento e maiores velocidades na área central, indicando zonas de estagnação e propensão à erosão. No segundo cenário, com vazão de 275 m³/h, a área ocupada pelo fluido aumentou, e os vórtices persistiram no canal de aproximação.

Quanto ao transporte de sedimentos, os resultados indicaram movimentações significativas em direção ao canal de aproximação e à base do vertedouro, com deposição predominante nessas áreas. Houve uma perda de aproximadamente 2% do volume total de sedimentos ao final da simulação, com evidências de erosão na entrada e no centro do reservatório.

Apesar das limitações inerentes à malha computacional e à simplificação de alguns parâmetros, o modelo tridimensional demonstrou boa capacidade de representar os fenômenos observados no modelo físico. Os resultados reforçam o potencial da modelagem reduzida para inferir o comportamento hidrossedimentológico de reservatórios reais, permitindo diagnósticos preliminares sobre zonas críticas de assoreamento e subsidiando o planejamento de medidas mitigadoras. A aplicação da equação de Meyer, Peter e Müller mostrou-se adequada para o cálculo do transporte de sedimentos nas condições simuladas, apresentando bom desempenho na previsão das áreas de deposição. A concepção do estudo também destacou a importância da validação cruzada entre modelos reduzidos e numéricos, considerando as limitações inerentes a cada abordagem, como simplificações computacionais, resolução da malha e a representação de turbulência.

RECONHECIMENTOS

Esta pesquisa foi possível graças ao Centro de Pesquisas e Recursos Hídricos (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais, e pelo concedimento da licença educacional do FLOW-3D por parte do Luciano Santana.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Hidrografia Ottocodificada (2017). Dados em formato shapefile.

BORLAND, W. M., MILLER, C. R. Distribution of Sediment in Large Reservoirs. Journal of the Hydrological Division, ASCE, v. 84. 1958.

CAMPELLO, B. S. C. Estudo Da Velocidade de Queda e do Início do Movimento das Partículas de Borracha e Areia. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. UFMG, Belo Horizonte /MG, 2017. CAMPOS, A. S. A Importância do Coeficiente de Rugosidade de Manning na Avaliação Numérica do Assoreamento de Reservatórios A Fio D'água. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. UFMG, Belo Horizonte /MG, 2018.

CARVALHO, N. O. Hidrossedimentologia prática, CPRM, Rio de Janeiro, 2008.

CEMIG, PCH Salto do Paraopeba. Disponível em: < <https://www.cemig.com.br/usina/pch-salto-doparaopeba/>>. Acesso em 12 de maio de 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Rodovias Federais 2021. Dados em formato shapefile.

FLOW-3D®. FLOW-3D® 2023R1 – User Manual. Disponível em: < <https://users.flow3d.com/flow3d/>>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Malha Municipal 2022. Dados em formato shapefile.

MIRANDA, R. B. A influência do assoreamento na geração de energia hidrelétrica: estudo de caso na Usina de Três Irmãos - SP. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental. USP, São Carlos/SP, 2011.

OLIVEIRA, M. A., OLIVEIRA, M. S. S. e MIRANDA, A. K. S. A sustentabilidade como perspectiva para repotenciação de pequenas centrais hidrelétricas no Brasil: método para estimativas. Ambiente & Sociedade, São Paulo, v. 25, 14 fev. 2022.

SOARES, W. S., Taxa de Assoreamento no Reservatório da Usina Hidrelétrica do Funil, MG. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias e Inovações Ambientais. UFLA, Lavras/MG, 2015