

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Natália Melo da Silva

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

Belo Horizonte
2024

Natália Melo da Silva

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

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem física e matemática em hidráulica

Orientadora: Edna Maria de Faria Viana

Coorientador: Jorge Luis Zegarra Tarqui

Belo Horizonte
2024

S586m Silva, Natália Melo da.
Modelagem fluidodinâmica computacional (CFD) do modelo
reduzido do reservatório da PCH Salto do Paraopeba [recurso eletrônico]
/ Natália Melo da Silva. – 2024.
1 recurso online (160 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Edna Maria de Faria Viana.
Coorientador: Jorge Luis Zegarra Tarqui.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 155-160.

1. Engenharia sanitária – Teses. 2. Recursos hídricos – Teses.
3. Usinas hidrelétricas – Teses. 4. Sedimentos fluviais – Transporte –
Teses. 5. Software (Engenharia) – Testes – Teses. I. Viana, Edna Maria
de Faria. II. Tarqui, Jorge Luis Zegarra. III. Universidade Federal de
Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

"Modelagem Fluidodinâmica Computacional (cfd) do Modelo Reduzido do Reservatório da Pch Salto do Paraopeba"

NATALIA MELO DA SILVA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. EDNA MARIA DE FARIA VIANA - Orientadora

Prof. JORGE LUIS ZEGARRA TARQUI - Coorientador

Prof. ANDRÉ LUIZ ANDRADE SIMÕES

Prof. ALOYSIO PORTUGAL MAIA SALIBA

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH Versão Final aprovada por

Documento assinado digitalmente
gov.br EDNA MARIA DE FARIA VIANA
Data: 21/06/2024 08:55:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Priscilla Macedo Moura
Coordenadora

Prof^a. Edna Maria de Faria Viana
Orientadora

Belo Horizonte, 17 de abril de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Edna Maria de Faria Viana, Professora do Magistério Superior**, em 22/04/2024, às 09:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **André Luiz Andrade Simões, Usuário Externo**, em 22/04/2024, às 09:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aloysio Portugal Maia Saliba, Usuário Externo**, em 22/04/2024, às 12:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jorge Luis Zegarra Tarqui, Professor do Magistério Superior**, em 26/04/2024, às 10:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3196261** e o código CRC **009EB85A**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha saúde física e mental, capacitando-me a enfrentar desafios com determinação. À minha mãe, Cleusa, por tornar realidade meu sonho de estudar na UFMG, aos meus irmãos, Karine, Gustavo e Cristiano, verdadeiros exemplos de dedicação e força. Às minhas sobrinhas, Bia e Laurinha, e ao meu sobrinho, Luizinho, pela esperança que trazem. Ao meu esposo, Lucas, meu parceiro de vida e apoiador incondicional.

Aos amigos e amigas que me acompanham desde o início do mestrado, agradeço pela crença em mim e pela torcida: Ju, Duda, Ninha, Sarah, Fê, Cíntia, Maria, Lê, Roy, Matheus, Morandi e Thiago. Um agradecimento especial aos amigos de partilha diária: Talita, Marina e Augusto. Agradeço também aos colegas do mestrado, especialmente àqueles com os quais pude me conectar mais profundamente. Ao Breno, pela calma e disponibilidade em me ajudar sempre; ao Bruno, pelo incentivo e por compartilharmos nossos anseios; e ao Vítor, pelas risadas e por tornar as aulas mais leves.

A Potamos Engenharia e Recursos Hídricos, pela compreensão em permitir que eu conciliasse meus compromissos acadêmicos e profissionais. Aos colegas que gentilmente me auxiliaram com valiosas dicas, especialmente ao Alexandre, pela generosidade em dedicar seu tempo para me orientar no processo e me encorajar a iniciar o mestrado e ao Murilo, cujo apoio foi fundamental na reta final.

Ao Luciano Santana, por conceder a licença do FLOW-3D. Professor Francisco, pela orientação anterior. Professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos pelo conhecimento transmitido durante as aulas. Ao CPH pelas informações cruciais ao desenvolvimento deste trabalho e à UFMG pelas diversas oportunidades.

Por fim, expresso minha gratidão aos responsáveis pelo desenvolvimento desta pesquisa. Ao professor Jorge, meu co-orientador, pela paciência e pelas contribuições na área do transporte de sedimentos. À minha orientadora, professora Edna, que me ofereceu todo o suporte necessário com prontidão e transmitindo sensibilidade e humildade que só a fazem mais admirável.

"A água é o princípio de todas as coisas"
(Tales de Mileto)

RESUMO

O assoreamento de reservatórios representa um desafio significativo para o desenvolvimento sustentável da geração de energia hidrelétrica, especialmente no contexto brasileiro, onde as usinas hidrelétricas desempenham papel crucial na matriz energética. As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) surgem como alternativas importantes para a geração de energia renovável complementar. Para otimizar projetos, construção, operação e repotenciação dessas PCHs, é vital estudar a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos em seus reservatórios.

A modelagem Fluidodinâmica Computacional Tridimensional (CFD 3D) emerge como a abordagem mais adequada para resolver equações diferenciais que descrevem o movimento dos fluidos. Este estudo propõe um método para reproduzir e avaliar fenômenos hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos no modelo físico da PCH Salto Paraopeba, localizada em Jeceaba, MG, desativada devido ao assoreamento total de sua tomada d'água.

Utilizou-se o *software* FLOW-3D, cuja verificação foi baseada em medidas de velocidade e em observações da formação de bancos de sedimentos no modelo físico reduzido, construído no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais. Foi demonstrada uma eficiente reprodução das condições observadas no experimento, apesar da necessidade de ajustes na malha computacional e análises adicionais de validação numérica.

No que diz respeito ao modelo hidráulico considerando o reservatório limpo, a curva de descarga do modelo numérico se aproximou significativamente daquela medida no modelo reduzido. A variação da altura de rugosidade do leito desempenhou papel crucial na calibração desses modelos, influenciando os padrões de escoamento.

Quanto à simulação do transporte de sedimentos, a formação da praia ao final assemelhou-se àquela do modelo reduzido, validando o uso da equação de Meyer, Peter e Muller (1948) para o cálculo do transporte de sedimentos. Os resultados do modelo computacional se aproximaram das observações experimentais, destacando a consistência da caracterização da borra.

A concepção deste trabalho demonstrou a eficiência em se utilizar um modelo reduzido na validação do modelo numérico computacional, dada a dificuldade de verificar diretamente com medidas no protótipo, assim como algumas das limitações encontradas nesse tipo de estudo.

Palavras-chave: transporte de sedimentos; modelo físico; Pequena Central Hidrelétrica.

ABSTRACT

The siltation of reservoirs poses a significant challenge to the sustainable development of hydroelectric power generation, particularly in the Brazilian context, where hydroelectric plants play a crucial role in the energy matrix. Small Hydroelectric Plants emerge as important alternatives for complementary renewable energy generation. To optimize the design, construction, operation, and repowering of these SHPs, it is vital to study the hydrodynamics and sediment transport in their reservoirs.

Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD 3D) modeling emerges as the most suitable approach for dealing with complex flow issues. This study proposes a method to reproduce and evaluate hydrodynamic and sediment transport phenomena in the physical model of the Salto Paraopeba Small Hydroelectric Power Plant, located in Jeceaba, MG, which was deactivated due to the complete siltation of its water intake. The FLOW-3D software was used, whose verification was based on velocity measurements and observations of sediment bank formation in the reduced physical model built at the Hydraulic Research and Water Resources Center (CPH) of the Federal University of Minas Gerais. An efficient reproduction of the observed conditions in the experiment was demonstrated, despite the need for adjustments in the computational mesh and additional numerical validation analyses.

Regarding the hydraulic model considering the clean reservoir, the discharge curve of the numerical model closely approached that measured in the reduced model. The variation in bed roughness played a crucial role in calibrating these models, influencing flow patterns.

As for the simulation of sediment transport, the formation of the beach at the end resembled that of the reduced model, validating the use of the Meyer, Peter, and Muller (1948) equation for sediment transport calculations. The computational model results closely matched experimental observations, highlighting the consistency of the rubber characterization.

The conception of this work demonstrated the efficiency of using a reduced model in validating the computational numerical model, given the difficulty of direct verification with measurements in the prototype, as well as some of the limitations encountered in this type of study.

Keywords: sediment transport; physical model; Small Hydroelectric Power Plant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Padrão típico de sedimentação em reservatório	29
Figura 2 – Propriedades físicas de um fluido newtoniano	32
Figura 3 – Diagrama reológico	35
Figura 4 – Sistema de coordenadas cartesianas e cilíndricas (a) coordenadas esféricas (b).....	40
Figura 5 – Elemento infinitesimal de um fluido	41
Figura 6 – Tensões superficiais em um elemento fluido	44
Figura 7 – Coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds da partícula ..	59
Figura 8 – Soma dos momentos	60
Figura 9 – Diagrama de Shields para materiais granulares	62
Figura 10 – Diagrama de Shields modificado.....	63
Figura 11 – Exemplo de malha ortogonal (a) e malha não ortogonal (b)	77
Figura 12 – Exemplo de malha estruturada (a) e malha não estruturada (b)	78
Figura 13 – Geometria real (a) e geometria representada (b) empregando o método <i>FAVORTM</i>	79
Figura 14 – Mapa de localização da PCH Salto do Paraopeba	86
Figura 15 – PCH Salto do Paraopeba em 2014 e modelo reduzido.....	87
Figura 16 – Curva granulométrica da borracha.....	89
Figura 17 – Ângulo de repouso da borracha: classe granulométrica 3,00 mm a 2,00 mm.	90
Figura 18 – Tensões críticas de Shields experimental da borracha em relação a curva de Shields modificada para massa específica igual a 1.140 kg/m^3	91
Figura 19 – Modelo digital de terreno utilizado na modelagem CFD.....	93
Figura 20 – Delimitação da malha computacional do estudo do modelo físico reduzido da PCH Salto do Paraopeba	94
Figura 21 – Detalhamento da malha computacional em perspectiva 3D do modelo físico reduzido da PCH Salto do Paraopeba	95
Figura 22 – Delimitação da malha computacional do estudo do modelo de transporte de sedimentos após 324s.....	97
Figura 23 – Curvas Cota x Volume do modelo reduzido da PCH Salto Paraopeba ..	98
Figura 24 – Localização das seções fluviais para extração de resultados	101

Figura 25 – Curva de descarga medida no modelo reduzido x curvas obtidas nas simulações	102
Figura 26 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,010 – Vazão 50,5 m ³ /h	104
Figura 27 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,024 – Vazão 50,5 m ³ /h	104
Figura 28 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,080 – Vazão 50,5 m ³ /h	105
Figura 29 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,19 – Vazão 50,5 m ³ /h	105
Figura 30 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,010 – Vazão 275,0 m ³ /h	106
Figura 31 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,024 – Vazão 275,0 m ³ /h	107
Figura 32 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,080 – Vazão 275,0 m ³ /h	107
Figura 33 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,19 – Vazão 275,0 m ³ /h	108
Figura 34 – Curvas de descarga do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba	109
Figura 35 – Velocidade na seção S-01 – Cenário 1 – Vazão 50,5m ³ /h.....	110
Figura 36 – Velocidade na seção S-02 – Cenário 1 – Vazão 50,5m ³ /h.....	111
Figura 37 – Velocidade na seção S-03 – Cenário 1 – Vazão 50,5m ³ /h.....	112
Figura 38 – Velocidade na seção S-04 – Cenário 1 – Vazão 50,5m ³ /h.....	113
Figura 39 – Velocidade na seção S-05 – Cenário 1 – Vazão 50,5m ³ /h.....	114
Figura 40 – Velocidade na seção S-06 – Cenário 1 – Vazão 50,5m ³ /h.....	115
Figura 41 – Velocidade na seção S-01 – Cenário 2 – Vazão 275m ³ /h.....	116
Figura 42 – Velocidade na seção S-02 – Cenário 2 – Vazão 275m ³ /h.....	117
Figura 43 – Velocidade na seção S-03 – Cenário 2 – Vazão 275m ³ /h.....	118
Figura 44 – Velocidade na seção S-04 – Cenário 2 – Vazão 275m ³ /h.....	119
Figura 45 – Velocidade na seção S-05 – Cenário 2 – Vazão 275m ³ /h.....	120
Figura 46 – Velocidade na seção S-06 – Cenário 2 – Vazão 275m ³ /h.....	121
Figura 47 – Comparação entre os pontos medidos e simulados na seção S-03 – Ks = 0,19	122
Figura 48 – Resultado de nível no reservatório sob Ks = 0,001	123
Figura 49 – Comparação entre os pontos medidos e simulados na seção S-03 – Ks = 0,001	123
Figura 50 – Comparação da velocidade na direção x	125
Figura 51 – Comparação da velocidade na direção y	125
Figura 52 – Comparação da velocidade média	125
Figura 53 – Componente de geometria para representação dos sedimentos compactados.....	127

Figura 54 – Borracha disposta no modelo hidráulico reduzido previamente ao escoamento.....	128
Figura 55 – Recorte temporal dos resultados da movimentação do sedimento compactado.....	129
Figura 56 – Geometria de praia obtida ao final da simulação no modelo hidráulico reduzido	130
Figura 57 – Padrão de velocidade obtido ao final da simulação de transporte de sedimentos.....	132
Figura 58 – Comparação de velocidade na seção S-03 para condição de reservatório limpo x assoreado	133
Figura 59 – Padrão de mudança da variação líquida de elevação obtido ao final da simulação de transporte de sedimentos.....	135
Figura 60 – Padrão de concentração de sedimentos suspensos obtido ao final da simulação de transporte de sedimentos.....	137
Figura 61 – Recorte temporal dos resultados da velocidade	139
Figura 62 – Resultados de velocidade na seção S-01 – Cenário 3 – Vazão 50,5m ³ /h	140
Figura 63 – Resultados de velocidade na seção S-02 – Cenário 3 – Vazão 50,5m ³ /h	141
Figura 64 – Resultados de velocidade na seção S-03 – Cenário 3 – Vazão 50,5m ³ /h	141
Figura 65 – Resultados de velocidade na seção S-04 – Cenário 3 – Vazão 50,5m ³ /h	142
Figura 66 – Resultados de velocidade na seção S-05 – Cenário 3 – Vazão 50,5m ³ /h	142
Figura 67 – Resultados de velocidade na seção S-06 – Cenário 3 – Vazão 50,5m ³ /h	143
Figura 68 – Recorte temporal dos resultados da variação líquida de elevação	144
Figura 69 – Recorte temporal dos resultados da concentração de sedimentos suspensos.....	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração das malhas de cálculo utilizadas na modelagem	97
Tabela 2 – Rugosidades definidas para calibração da rugosidade	99
Tabela 3 – Métricas de erro relacionando a curva de descarga medida às simuladas	102
Tabela 4 – Verificação numérica das velocidades do Cenário 1	122
Tabela 5 – Verificação numérica das velocidades simulação sob $K_s=0,001$	124
Tabela 6 – Comparação das velocidades entre reservatório limpo e assoreado	134

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABREVIACÕES E SIGLAS:

- ADV – Velocímetro Acústico Doppler (*Acoustic Doppler Velocimeter*)
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
- CFD – Dinâmica Computacional dos Fluidos (*Computational Fluid Dynamic*)
- CGH – Central Geradora Hidrelétrica
- CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos
- EUA – Estados Unidos da América
- FAVORTM – Representação Fracionária de Obstáculos de Área-Volume (*Fractional Area/Volume Obstacle Representation*)
- GMO – Modelo Geral de Objetos Móveis (*General Moving Object*)
- MDF – Método das Diferenças Finitas
- MEF – Método dos Elementos Finitos
- MVF – Método dos Volumes Finitos
- MG – Minas Gerais
- PCH – Pequena Central Hidrelétrica
- QGIS – Quantum GIS
- RNG – Teoria do Grupo de Renormalização (*Renormalized Group Theory*)
- SP – São Paulo
- TDMA - Método da Matriz Tridiagonal ou Algoritmo de Thomas (*Tri-diagonal Matrix Algorithm*)
- TO – Tocantins
- TR – Tempo de Retorno
- UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais
- UHE – Usinas Hidrelétricas de Energia
- SIMPLE – Método Semi-Implícito para Equações com Pressão Acoplada (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*)
- VOF – Volume de Fluido (*Volume of Fluid*)
- 1-D – Unidimensional
- 2-D – Bidimensional
- 3-D – Tridimensional

M-1 – Curva de remanso - Inclinação suave (*Mild Slope*)

SÍMBOLOS:

a – aceleração

g – aceleração da gravidade

f – aceleração viscosa

K_s – altura da rugosidade

φ – ângulo de repouso

A – área

C_d – coeficiente de arrasto

ε – coeficiente de difusão de massa

C_0 – coeficiente de forma Corey

K_{st} – coeficiente de rugosidade do leito de Strickler

n – coeficiente de rugosidade de Manning

K_r – coeficiente de rugosidade da partícula

ξ – coeficiente de transição entre geometria cartesiana e cilíndrica

l – comprimento da partícula

C – concentração

C_v – concentração volumétrica

(x, y, z) – coordenadas ortogonais cartesianas

(r, θ, z) – coordenadas ortogonais cilíndricas

(r, θ, ϕ) – coordenadas ortogonais esféricas

(u, v, w) – componentes de velocidade nas direções das coordenadas $(x, y$ e $z)$

S – gradiente de energia ou declividade da linha energética

I – declividade do fundo

ρ – densidade do fluido

ρ_s – densidade do sedimento

Q – descarga ou vazão

q_{sa} – descarga sólida do leito

D – deslocamento

d – diâmetro

d_{10} – diâmetro do sedimento para o qual 10% da mistura é mais fina

d_{50} – diâmetro do sedimento para o qual 50% da mistura é mais fina
 d_{90} – diâmetro do sedimento para o qual 90% da mistura é mais fina
 d_m – diâmetro médio da composição do material do leito
 d_h – dimensão geométrica característica
 k – energia cinética turbulenta
 r – escalas do modelo
 S_p – esfericidade de uma partícula ou fator de forma
 δ – espessura da camada laminar
 e – espessura da camada onde ocorre o transporte de sedimentos no leito
 J_η – fluxo difusivo em uma determinada direção η
 F – força
 F_D – força de arrasto
 F_G – força de gravidade submersa
 $^{\circ}\text{C}$ – grau Celsius
 G – gravidade específica
 m – massa
 ρ – massa específica ou densidade absoluta do fluido
 ρ_s – massa específica do sedimento
 M – modelo físico reduzido
 Fr – número de Froude
 Re – número de Reynolds
 Re_p – número de Reynolds da partícula
 τ_* – parâmetro de Shields
 b – perda de fluxo em meios porosos ou através de placas perfuradas porosas
 γ – peso específico da água
 γ_m – peso específico da mistura de fluido
 γ_s – peso específico do sedimento
 γ'_s – peso específico do sedimento submerso
 p – pressão
 H – profundidade do fluxo
 y_n – profundidade normal
 p – protótipo
 R_h – raio hidráulico

d_s – tamanho da partícula

ε – taxa de dissipação turbulenta

q_{sw} – taxas de transporte de carga suspensa em termos do peso

q_{sv} – taxas de transporte de carga suspensa em termos de volume

T – temperatura

t – tempo

τ – tensão de cisalhamento

τ_0 – tensão de cisalhamento limite

σ – tensão normal

u_* – velocidade de cisalhamento

w_s – velocidade de queda da partícula

U – velocidade média do fluxo

v – vetor de velocidade

ν – viscosidade cinemática

μ – viscosidade dinâmica

ν_m – viscosidade cinemática da mistura

∇ – volume

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	JUSTIFICATIVA	23
3	OBJETIVOS	23
3.1	Objetivo Geral	23
3.2	Objetivos Específicos	23
4	REVISÃO DA LITERATURA	24
4.1	Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH	24
4.1.1	Definições e funcionamento	24
4.1.2	Classificação	25
4.1.3	Repotenciação.....	26
4.2	Reservatórios.....	27
4.2.1	Contexto	27
4.2.2	Deposição de sedimentos	28
4.2.3	Impactos ambientais associados.....	29
4.2.4	Controle e monitoramento	30
4.3	Mecânica dos fluidos.....	31
4.3.1	Propriedades físicas	32
4.3.2	Classificação dos escoamentos	34
4.3.3	Equações fundamentais	39
4.4	Método de discretização	47
4.4.1	Breve panorama	48
4.4.2	Método dos Volumes Finitos (MVF)	49
4.5	Transporte de sedimentos	51
4.5.1	Contexto	51
4.5.2	Caracterização do sedimento	53
4.5.3	Resistência ao escoamento	55
4.5.4	Velocidade de queda das partículas.....	56
4.5.5	Início do movimento dos sedimentos	60
4.5.6	Quantificação do transporte de sedimentos	64
4.6	Modelos hidráulicos reduzidos.....	69
4.6.1	Análise dimensional e teoria da semelhança	69
4.7	Modelagem fluidodinâmica computacional tridimensional (CFD-3D).....	74
4.7.1	Definição e vantagens	74
4.7.2	Constituição do modelo CFD FLOW-3D HYDRO.....	75

5	METODOLOGIA / MATERIAL E MÉTODOS	85
5.1	Descrição da área de estudo	85
5.2	Modelo hidráulico reduzido da PCH Salto do Paraopeba	86
5.3	Representação do sedimento	88
5.4	Modelo numérico computacional	91
5.4.1	Premissas e critérios	91
5.4.2	Geometria.....	92
5.4.3	Malha.....	93
5.4.4	Curva Cota x Volume	98
5.4.5	Condições iniciais e de contorno	98
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	100
6.1	Calibração da rugosidade	101
6.2	Curva de descarga.....	108
6.3	Comparação dos resultados de velocidade nas seções	109
6.3.1	Comparação entre as seções medidas e simuladas – Cenário 1.....	110
6.3.2	Comparação entre as seções medidas e simuladas – Cenário 2.....	115
6.3.3	Verificação numérica das velocidades na seção S-03 – Cenário 1	121
6.4	Transporte de sedimentos no reservatório – Cenário 3	126
6.4.1	Configuração do modelo	126
6.4.2	Resultados da simulação de transporte de sedimentos	128
7	CONCLUSÕES	147
8	RECOMENDAÇÕES.....	151
	REFERÊNCIAS.....	153

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por energia elétrica, a repotenciação de usinas com baixo potencial de geração ou já desativadas é uma alternativa a ser considerada. Esse processo envolve intervenções nas estruturas, circuitos hidráulicos e equipamentos eletromecânicos, resultando em ganhos de potência e eficiência, com benefícios econômicos e socioambientais (OLIVEIRA, 2012).

Oliveira, Oliveira e Miranda (2022) apresentaram as práticas de repotenciação em Pequenas Centrais Hidrelétricas no Brasil e propuseram um método acessível para estimar os benefícios da repotenciação de uma central hidrelétrica. A aplicação do método na CGH Bagagem-TO permitiu estabelecer alternativas realistas de repotenciação, inferindo-se que todas as alternativas avaliadas seriam viáveis se comparadas com a opção de implantação de novos aproveitamentos hidrelétricos.

Porém, o assoreamento de reservatórios representa um dos principais desafios para a sustentabilidade na geração de energia hidrelétrica, sendo particularmente significativo para o Brasil, dado seu alto grau de dependência desse tipo de geração de energia. A matriz elétrica brasileira é uma das mais renováveis do mundo e, conforme o Sistema de Informações de Geração da ANEEL (2023), a potência total atual fiscalizada é de 191,63 gigawatts, sendo 83,5% renovável. Cerca de 68,6% da parcela renovável provém das usinas hidrelétricas, sendo 94,0% da geração obtida a partir de Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE), 5,23% de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e 0,79% de Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH).

As PCHs ocupam o 5º lugar no ranking de capacidade instalada da matriz energética do país (ANEEL, 2023). Albarello (2014) afirma que as PCHs são uma importante alternativa de geração complementar de energia renovável, tendo em vista seus impactos ambientais, complexidade técnica, investimentos e prazos de implantação mais baixos se comparados às UHEs. Assim, torna-se necessária a elaboração de projetos de PCHs que minimizem os impactos advindos do assoreamento.

A vida útil de um reservatório está diretamente ligada ao período em que sua operação é viável do ponto de vista econômico, ou seja, ao tempo necessário para que o reservatório seja preenchido por sedimentos ou que suas estruturas sejam

comprometidas. Sendo, normalmente, a área alagada e volume do reservatório pequenos nas PCHs, principalmente para usinas que operam a fio d'água, as consequências de uma gestão ineficiente podem resultar em aumento significativo na produção de sedimentos e acúmulo no reservatório, reduzindo sua vida útil. Conforme destacado por Julien (2010), isso acarreta custos elevados relacionados à manutenção, remoção dos sedimentos ou diminuição da capacidade operacional, além de causar erosão prejudicial às estruturas. A instabilidade do fluxo resultante pode levar a falhas, diminuindo a vida útil do reservatório ou até mesmo impedindo sua operação.

De acordo com Mahmood (1987), um estudo do Banco Mundial verificou que a vida útil média dos reservatórios existentes em todos os países no Mundo decresceu de 100 para 22 anos e que a perda média anual de volume dos reservatórios devido ao depósito de sedimentos era de 1%, sendo variável conforme o país e a região. Em relação ao Brasil, a partir do estudo realizado pela Eletrobras/IPH (1992), têm-se que a perda anual de capacidade de armazenamento dos reservatórios é de aproximadamente 0,5% (Carvalho, 1994, apud CARVALHO et al., 2000). Porém, podem-se citar outros estudos da estimativa de perdas de vida útil em reservatórios no país com taxa superior a esta. Miranda (2011) estimou uma redução de 14,5% no volume útil do reservatório da usina hidrelétrica de Três Irmãos-SP em um período de 15 anos. Soares (2015) estimou uma diminuição anual de 1,05% da capacidade de armazenamento do reservatório da usina hidrelétrica do Funil-MG.

Para otimizar o projeto, construção, operação e repotenciação de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), é fundamental estudar a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos em seus reservatórios. Conforme Carvalho (2008), os estudos sedimentológicos devem ser realizados em todas as fases do aproveitamento hidrelétrico e no que tange a fase de operação, é necessário acompanhar as condições de assoreamento do reservatório, sendo esta uma das aplicações mais tradicionais de um estudo sedimentológico.

O estudo do transporte de sedimentos exige a utilização de cálculos matemáticos trabalhosos, com uso de ábacos baseados em experimentos limitados, além do uso de simplificações e coeficientes. Segundo Carvalho (2008), os métodos empíricos e

semi-empíricos foram os primeiros a serem desenvolvidos para avaliação de assoreamento. Como exemplo, o método de Borland & Miller (1958), desenvolvido experimentalmente nos EUA, se baseia na relação entre a forma do reservatório e a porcentagem de sedimentos depositados ao longo do leito em diversos níveis do reservatório.

Devido ao aumento do poder computacional dos últimos anos, a utilização de métodos numéricos computacionais tornou-se uma alternativa viável na análise de estudos de transpõe de sedimentos. Modelos numéricos de uma, duas e três dimensões (1-D, 2-D e 3-D) são usados com base nos objetivos do estudo. Conforme a dimensão do modelo aumenta, obtêm-se resultados mais precisos, porém, demandando mais informações, tempo e custo computacional (Mohammad et al., 2020). Isso implica em maior necessidade de memória (RAM e HD) e processamento mais potente, além dos custos relacionados à instalação da máquina, refrigeração e consumo de energia elétrica. Cabe ressaltar que o HEC-6 (atual HEC-RAS) é um modelo unidimensional amplamente utilizado no estudo de transporte de sedimentos desenvolvido na década de 1960 pelo *Hydrological Engineerin Center/ U.S. Army Corps of Engineers* (CARVALHO, 2008).

A verificação da precisão desses modelos é uma questão fundamental, tendo em vista que as equações em que se baseiam esses modelos, utilizam uma série de coeficientes, havendo a necessidade de calibração. A validação dos métodos numéricos pode ser feita com base em medições de campo, como no estudo de Hillebrand, Klassen, Olsen (2017), que utilizou modelagem numérica tridimensional (3D) para a simulação do transporte de sedimentos no reservatório hidrelétrico de Iffezheim, Alemanha. A precisão dos cálculos pôde ser verificada com base em medições de velocidade e mudanças de elevação do leito no protótipo (escala real) durante um período de 3 meses.

Contudo, nem sempre a realização de medições em campo é viável e, dessa forma, a construção de modelos físicos reduzidos é uma alternativa. Nesse contexto, é possível utilizar modelos físicos em escala reduzida para investigar os fenômenos em questão, estabelecendo uma correlação com os valores do protótipo. Esse processo inclui a aplicação de análise dimensional para determinar a escala adequada e, por

consequente, ajustar os coeficientes obtidos nas equações teóricas. Além disso, em conjunto com a modelagem física, a modelagem numérica pode ser empregada para extrapolar as condições simuladas em laboratório.

O estudo de Teixeira et al. (2020) propõe a combinação de modelagem matemática e parametrização de dados de campo com o desenvolvimento de uma metodologia para simulação física de assoreamento. Foi utilizado o *software River Analysis System* (HEC-RAS), no qual foram inseridas as vazões diárias da série histórica e a curva de classificação de sedimentos da PCH Salto Paraopeba no período de 2013 e 2017, após serem convertidas para a escala do modelo reduzido.

Para este fim, o uso de modelagem CFD-3D tornou-se viável durante a última década mediante um maior desenvolvimento de módulos de transporte de sedimentos em dinâmica de fluidos computacional (CFD). Em se tratando de problemas em sistemas nos quais o comportamento dos fluidos pode ser difícil de prever, como na distribuição de velocidade e zonas de deposição e erosão em reservatórios, pressupõe-se que a modelagem fluidodinâmica computacional tridimensional (CFD-3D) seria mais adequada.

Haun et al. (2013) utiliza um modelo numérico tridimensional para calcular a distribuição de sedimentos suspensos e o padrão de deposição no reservatório hidrelétrico de Angostura, Costa Rica. Esses cálculos foram fundamentados em medições pontuais de sedimentos suspensos ao longo da profundidade em diferentes locais do reservatório com um dispositivo de medição de difração a laser.

O presente trabalho, propõe o uso da modelagem (CFD-3D) para analisar a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos no modelo físico reduzido da PCH Salto do Paraopeba, localizada em Jeceaba–MG. Esta usina foi desativada devido ao assoreamento de sua tomada d'água. O modelo foi construído no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais, e os dados experimentais de velocidade e observações da formação de bancos de sedimentos foram utilizados para validar o modelo.

2 JUSTIFICATIVA

O desafio representado pelo assoreamento de reservatórios na geração de energia hidrelétrica destaca a importância do estudo do transporte de sedimentos, especialmente em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). Nos últimos anos, o destaque tem sido para o uso de modelos numéricos computacionais em estudos de transporte de sedimentos, impulsionado pelo aumento do poder computacional e pela consequente redução de custos. No entanto, a precisão desses modelos requer verificação, uma vez que suas equações dependem de coeficientes que precisam ser calibrados, dentre outras limitações.

Nesse contexto, a validação dos métodos numéricos geralmente se baseia em medições de campo, embora essa abordagem nem sempre seja viável. Uma alternativa promissora é a adoção da modelagem física. Este estudo busca promover o uso dessa abordagem para validar modelos numéricos, explorar os módulos de transporte de sedimentos para entender e verificar a adequação das equações empíricas, além de incentivar pesquisas adicionais relacionadas à aplicação prática na gestão eficiente de reservatórios hidráulicos e estudos de viabilidade da repotenciação de Pequenas Centrais Hidrelétricas.

Em última análise, o objetivo deste estudo é contribuir para o aprimoramento das técnicas de modelagem numérica tridimensional, juntamente com sua validação por meio do uso de modelagem física reduzida.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência de um modelo numérico tridimensional em reproduzir as condições hidráulicas e o transporte de sedimentos em reservatórios a fio d'água, utilizando como base as medições de velocidade e as observações da formação de bancos de sedimentos em um modelo em escala reduzida.

3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Verificar a precisão dos cálculos realizados num modelo numérico tridimensional na previsão do assoreamento do reservatório;
- Avaliar a variação de rugosidade do leito para as condições de reservatório limpo e assoreado;
- Obter a curva de descarga do vertedor a partir do modelo numérico, com base em medidas no modelo reduzido;
- Analisar os campos de velocidade, o transporte, a deposição e a erosão dos sedimentos formados no reservatório.

4 REVISÃO DA LITERATURA

Para uma compreensão abrangente dos fenômenos associados à hidrodinâmica de reservatórios a fio d'água e da relevância de um modelo hidráulico reduzido em estudos concernentes à previsão do assoreamento, foram explorados tópicos relevantes na literatura disponível, destacando-se os campos de estudo fundamentais, como: a mecânica dos fluidos, o transporte de sedimentos e a modelagem fluidodinâmica computacional. Ao integrar esses temas, é possível alcançar uma compreensão mais holística das interações complexas entre o modelo numérico tridimensional, o reservatório real e o modelo reduzido, proporcionando assim uma avaliação mais precisa e abrangente da eficácia do modelo na simulação das condições previstas.

4.1 Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH

4.1.1 Definições e funcionamento

A Resolução Normativa nº 1.070, de 29 de agosto de 2023, estabelece que os aproveitamentos hidrelétricos com potência instalada superior a 5.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW serão considerados como Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH.

O funcionamento de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH) é semelhante ao de uma grande usina hidrelétrica, aproveitando quedas em rios para gerar eletricidade. Esta é fundamentalmente composta por quatro elementos principais: uma barragem, encarregada de represar a água e criar um reservatório; um sistema de adução e captação de água, responsável por captar água do reservatório e direcioná-la para as

turbinas; uma casa de força, que aloja as turbinas e os geradores; e um sistema de restituição de água ao leito do rio (ALBARELLO, 2014).

A produção de energia por meio de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH) é reconhecida como uma fonte de energia renovável devido à sua característica de não consumir água. O processo envolve a conversão da energia potencial gravitacional da água armazenada em represas em energia cinética, à medida que é conduzida por tubos ou canais até a casa de força, onde se encontra o conjunto turbina-gerador. Na turbina, a energia cinética é transformada em energia mecânica ao girá-la, e no gerador, essa energia mecânica é convertida em eletricidade. Após ajuste de voltagem, a eletricidade é transmitida para as comunidades locais ou para a rede nacional, enquanto a água retorna ao rio (NAVIGANT, 2013).

4.1.2 Classificação

No Brasil as PCHs podem ser classificadas de acordo com seu sistema de adução, podendo ser de adução em baixa pressão, por meio de escoamento livre em canal, tubulação de baixa pressão ou túnel, ou alta pressão em conduto forçado por meio de tubos, ou tuneis. Também são classificadas de acordo com sua capacidade de regularização, podendo ser a fio d'água, de acumulação com regularização diária ou mensal do reservatório (ELETROBRAS, 2000).

Conforme o documento "Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas" elaborado por Eletrobras (2000), uma PCH a fio d'água é empregada quando as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender a demanda máxima prevista. Assim, as barragens das PCHs são baixas, com função apenas de desviar o fluxo para o circuito de adução, com áreas inundadas e volume do reservatório pequenos.

As PCHs de acumulação podem ser com regulação diária ou mensal do reservatório. O primeiro caso é empregado quando as vazões de estiagem do rio são inferiores à necessária para fornecer a potência para suprir a demanda máxima, cujo reservatório fornecerá o adicional necessário de vazão regularizada. Já no segundo caso, o projeto considera dados de vazões médias mensais no seu dimensionamento energético, analisando as vazões de estiagem médias mensais, pressupõe-se uma regularização

mensal das vazões médias diárias, promovida pelo reservatório (ELETROBRAS, 2000).

4.1.3 Repotenciação

Ao longo da vida útil de uma PCH são necessárias intervenções para manter seu funcionamento e garantir a eficiência na geração de energia. A repotenciação pode ser uma alternativa viável para obter o melhor aproveitamento do potencial hidráulico em usinas já desativadas ou em processo final da sua vida útil, com ganhos energéticos, econômicos e socioambientais, tendo em vista o estado e suas condições de operação (OLIVEIRA, 2012).

Oliveira (2012), define a repotenciação como: “uma intervenção ou conjunto de intervenções nas estruturas, circuitos hidráulicos e equipamentos eletromecânicos envolvidos no processo de conversão energética de um empreendimento hidrelétrico já construído, com ganho simultâneo de potência e rendimento, conciliados com benefícios econômicos e socioambientais”.

Dentre suas principais vantagens cita-se a minimização ou inexistência dos custos ambientais e possível compensação em crédito de carbono; menor custo se comparado aos custos de construção de novas usinas; possibilidade de implantação a curto prazo; disponibilização de energia adicional próxima aos grandes centros consumidores etc. Entretanto, pode haver custos significativos que devem ser considerados, como os custos advindos das intervenções nas estruturas civis e hidráulicas, desapropriações, construção de novos circuitos hidráulicos, novas casas de máquinas, alteamento e reforço na barragem (OLIVEIRA, 2012).

A literatura disponível sobre repotenciação de pequenas centrais hidrelétricas é limitada, evidenciando uma lacuna na área. O trabalho de Oliveira, Oliveira e Miranda (2022) aborda essa questão, fornecendo uma discussão teórica das práticas existentes e propondo um método acessível para apoiar a decisão sobre a aplicabilidade da repotenciação em pequenas hidrelétricas. Os resultados destacam a sustentabilidade ambiental dessa prática, considerando as limitações e desafios associados à construção de grandes hidrelétricas. A repotenciação é considerada uma opção sustentável devido à dinamicidade dos recursos naturais, mudanças nos

critérios de avaliação socioambiental, avanços tecnológicos e a crescente demanda por energia. O trabalho destaca a contribuição da repotenciação para enfrentar o envelhecimento do parque hidrelétrico brasileiro.

Añazco et al. (2019) propõem uma abordagem metodológica para avaliar a viabilidade técnica e econômica da repotenciação de Pequenas Centrais Hidrelétricas, incorporando uma análise abrangente do estado atual de elementos críticos da usina, como equipamentos eletromecânicos e infraestrutura existente. A análise técnica engloba estudos hidrológicos, enquanto a análise financeira oferece uma ferramenta valiosa para determinar a viabilidade do projeto de repotenciação. O estudo de caso concentra-se na usina El Amarillo, localizada em Portovelo, Equador, uma PCH que se encontra atualmente em estado de abandono.

4.2 Reservatórios

4.2.1 Contexto

Como mencionado previamente, os reservatórios de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) são projetados para armazenar água visando à geração de energia. No entanto, a construção de uma barragem no leito do rio altera o fluxo natural de água e sedimentos. A sedimentação é influenciada pela velocidade do escoamento e pelo tamanho dos sedimentos, como apontado por Carvalho (2008).

Dessa forma, quando os afluentes contribuem com sedimentos, a profundidade do escoamento aumenta, reduzindo a inclinação do fundo e desacelerando o fluxo, resultando na deposição de sedimentos. Sedimentos mais grossos se depositam primeiro na cabeceira, enquanto correntes de densidade carregam os sedimentos mais finos em direção à barragem. Os sedimentos podem ser transportados rio abaixo a partir de sistemas de descarga e extravasamento, causando abrasão em estruturas e peças, além do fato de que o escoamento se torna mais acelerado, aumentando as condições propícias para a erosão a jusante (JULIEN, 2010).

O acúmulo de sedimentos reduz a eficiência de armazenamento do reservatório e aumenta a formação de remanso a montante, acelerando o transporte de sedimentos (CARVALHO ET AL., 2000). Em se tratando de pequenos reservatórios, o assoreamento ocorre de maneira ainda mais acelerada, já que é frequentemente

encontrado em áreas mais suscetíveis à erosão, devido aos declives pronunciados e às intensas precipitações orográficas da topografia regional (CARVALHO, 2008).

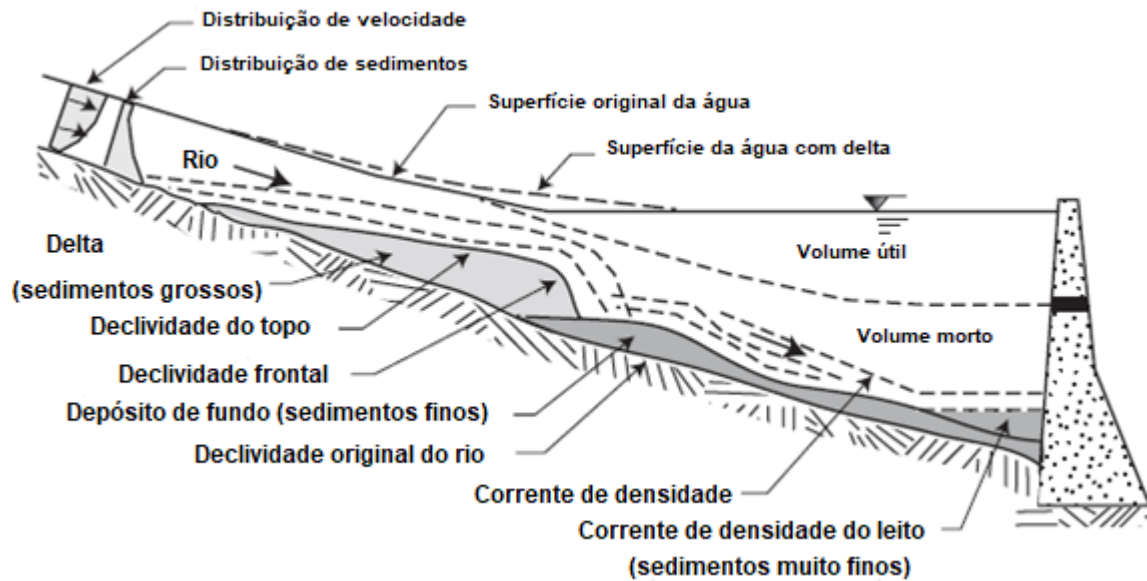
4.2.2 Deposição de sedimentos

O aporte de sedimentos é influenciado pela produção na bacia de contribuição, transporte nos afluentes, modo de deposição e outros fatores, como regime do rio, cheias, geometria, operação, floculação, consolidação de sedimentos e mudanças no uso do solo ao longo da vida útil do reservatório (JULIEN, 2010). O processo de deposição nos reservatórios não é distribuído de maneira uniforme e pode ser classificado, conforme Carvalho et al. (2000) e Vanoni (1975), em:

- **depósito do remanso (backwater deposit):** deposição que ocorre a montante do reservatório e que podem criar problemas de enchentes;
- **deposição delta:** ocorre conforme o nível d'água. O delta se forma a partir de sedimentos mais grossos na cabeceira dos reservatórios, causando a redução da sua capacidade de armazenamento;
- **depósito de fundo ou leito (bottom-set deposit):** material fino, geralmente siltes e argilas, depositado no fundo de um reservatório, mais a jusante, causando a redução do volume morto;
- **depósito de margem (overbank):** deposição dos sedimentos trazidos pelas ondas da água e pelo vento;
- **depósito de várzea ou de planície de inundação:** se forma a partir de enchentes ao longo do curso d'água e do reservatório, formado por sedimentos grossos e finos.

A Figura 1 ilustra um padrão típico de sedimentação em reservatórios.

Figura 1 – Padrão típico de sedimentação em reservatório



Fonte: Adaptado de Frenette e Julien (1986 apud JULIEN, 2010).

4.2.3 Impactos ambientais associados

A construção de barragens e a formação de reservatórios resultam em impactos tanto a montante quanto a jusante da estrutura. A acumulação de sedimentos no reservatório é um fator que contribui para o assoreamento gradual do lago, diminuindo seu volume de água. Esse processo pode afetar a regularização do curso d'água, reduzir a vida útil do lago e aumentar o risco de enchentes, além de prejudicar a navegação e estruturas fluviais devido ao acúmulo de sedimentos nas calhas dos rios, conforme indicado por Carvalho (2008). Esses impactos também têm o potencial de prejudicar a fauna local, dentre outros problemas associados.

Os efeitos como a erosão nas descargas do vertedouro e nas tomadas d'água, o rebaixamento do leito do rio, alterações morfológicas no canal principal, entre outros, são observados a jusante. Os trechos do rio a jusante enfrentam impactos ambientais significativos, incluindo mudanças nos padrões de vazão, redução da carga de sedimentos, modificações na concentração de nutrientes, flutuações na temperatura, o que prejudica a vida aquática, conforme destacado por Carvalho (2008). A complexidade desses fenômenos impõe desafios à modelagem matemática, principalmente devido à escassez de dados e observações sistemáticas, conforme mencionado pelo autor. Detalhes mais aprofundados sobre os efeitos dos sedimentos no meio ambiente podem ser encontrados nesta referência.

4.2.4 Controle e monitoramento

O controle eficaz da sedimentação em reservatórios envolve a redução da produção de sedimentos na bacia, implementando práticas de conservação do solo, aumento da cobertura vegetal e utilização de estruturas como canais de desvio e bacias de sedimentação (JULIEN, 2010). Para implementar essas medidas, é necessário monitorar o transporte sólido a montante e a jusante, examinar depósitos no reservatório e realizar estudos de erosão nas margens e, ocasionalmente, na bacia (CARVALHO, 2008).

A medição da carga afluyente de sedimentos deve ocorrer em estações apropriadas ao longo de vários anos antes da construção do reservatório. Modelos matemáticos, como a equação universal de perda de solo, são úteis para prever perdas de solo por escoamento superficial, especialmente quando há dados suficientes disponíveis. Levantamentos pós-fechamento da barragem fornecem informações sobre deposição, eficiência de retenção e densidade do sedimento, sendo essenciais para a operação eficiente do reservatório. Além disso, amostrar os sedimentos depositados é crucial para determinar densidade e distribuição do tamanho das partículas (JULIEN, 2010).

Dada a complexidade dos desafios relacionados à sedimentação, não existe uma única medida de controle. Essas medidas podem ser categorizadas da seguinte forma: I) Controle da bacia hidrográfica, mediante a aplicação de práticas de conservação do solo e aumento da cobertura vegetal. Essas ações mostram eficácia na redução da produção de sedimentos e são viáveis em pequenas bacias, embora possam acarretar custos significativos em bacias de maior porte; II) Controle do transporte de sedimentos para o reservatório, que implica o manejo adequado da bacia, a implementação de estruturas para retardar a sedimentação e a estabilização do leito do rio; III) Controle da deposição, iniciando com o projeto apropriado do reservatório, incluindo a determinação estratégica de saídas e extravasores. Adicionalmente, podem ser necessários métodos de remoção de sedimentos, como dragagem, lavagem e descarga, com uma atenção especial aos custos envolvidos (JULIEN, 2010).

4.3 Mecânica dos fluidos

A mecânica dos fluidos é o estudo de fluidos em repouso (estática) ou em movimento (dinâmica). A distinção entre fluido ou sólido está relacionada à resposta à tensão de cisalhamento, sendo que um sólido pode resistir à tensão aplicada por uma deflexão estática, enquanto um fluido não resiste e se move em resposta a qualquer tensão de cisalhamento, escoando continuamente (WHITE, 2011).

O estudo do escoamento de fluidos requer um equilíbrio entre teoria e experimentação. Embora a teoria forneça leis fundamentais, sua aplicação muitas vezes é limitada em situações práticas devido à complexidade geométrica e à viscosidade. A análise experimental, complementando a teoria, é crucial, sendo os dados experimentais frequentemente a principal fonte de informações sobre escoamentos específicos (WHITE, 2011).

Na análise de problemas de mecânica dos fluidos, conforme Fox, Pritchard e McDonald (2010), é comum estabelecer um "volume de controle". Esse volume refere-se a uma região arbitrária no espaço por onde o fluido se desloca, sendo sua fronteira geométrica (superfície de controle) real ou imaginária, podendo estar em repouso ou em movimento. Dessa forma, a aplicação das leis fundamentais pode ser expressa em termos de sistemas e volumes de controle infinitesimais ou finitos. Para o primeiro caso, têm-se como resultados as equações diferenciais, onde a solução das equações diferenciais do escoamento dos fluidos oferece uma abordagem detalhada para determinar o comportamento do escoamento. Já para o segundo caso, a aplicação exige uma formulação integral, quando a informação desejada não requer um conhecimento detalhado do escoamento.

Segundo Fox, Pritchard e McDonald (2010), as equações básicas para resolução de problemas de mecânica dos fluidos são: 1) Conservação da massa; 2) Segunda lei do movimento de Newton; 3) Princípio da quantidade de movimento angular; 4) Primeira lei da termodinâmica e 5) Segunda lei da termodinâmica. As duas primeiras serão tratadas nos itens subsequentes.

4.3.1 Propriedades físicas

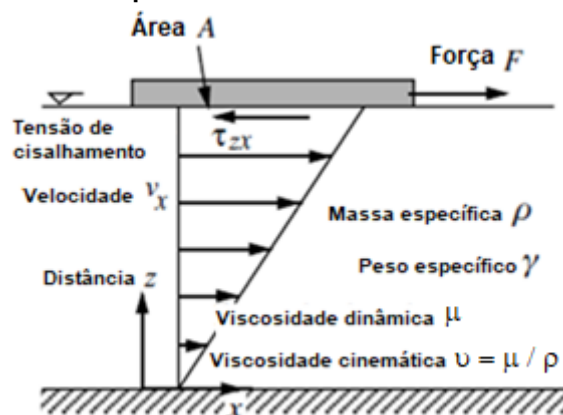
Os fluidos se dividem em líquidos e gases conforme os efeitos das forças de coesão. Líquidos, com moléculas agrupadas e forças coesivas fortes, mantêm volume e formam superfície livre. Em contraste, gases têm moléculas espaçadas e forças coesivas desprezíveis, permitindo expansão até os limites das paredes que os confinam (WHITE, 2011).

A Figura 2 proporciona uma representação visual do escoamento de um fluido em escoamento livre (à pressão atmosférica) a partir da perspectiva de um volume de controle, conforme Julien (2002). Nessa representação, um bloco de fluido é delineado em um sistema cartesiano de coordenadas nas direções x e z , posicionado sobre um plano rígido de área (A) e sujeito ao seu próprio peso. O escoamento do fluido é influenciado por uma força (F).

Destaca-se a presença da tensão de cisalhamento tangencial à direção do fluxo, denotada por, τ_{zx} , e a variação do gradiente de velocidade, v_x , em relação à profundidade z . Esses elementos contribuem para a compreensão do comportamento do fluido em análise durante o seu deslocamento.

As principais propriedades físicas do fluido, também representadas nesta figura, serão detalhadas na sequência, baseando-se nas referências de Julien (2010) e Baptista e Lara (2014).

Figura 2 – Propriedades físicas de um fluido newtoniano



Fonte: Adaptado de Julien (2002).

- Massa específica:

A massa específica, representada por ρ , é a quantidade de massa de fluido por unidade de volume, equação (1). Para a água a 4 °C, atinge o valor máximo de $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$ e apresenta variações ligeiras conforme a temperatura.

$$\rho = m/\nabla \quad (1)$$

Sendo:

ρ : massa específica ou densidade absoluta do fluido,

m : massa do fluido,

∇ : volume do fluido.

- Peso específico:

O peso do fluido por unidade de volume é denominado peso específico, representado pelo símbolo γ (gama). A 4 °C, o peso específico da água é $\gamma = 9.810 \text{ N/m}^3$. Este valor apresenta ligeiras variações com a temperatura e pode ser expresso por meio da equação (2), utilizando o Sistema de Medidas Internacional, onde, g representa a aceleração gravitacional igual a $9,81 \text{ m/s}^2$.

$$\gamma = \rho g \quad (2)$$

- Viscosidade dinâmica:

A viscosidade dinâmica do fluido, μ , é o coeficiente angular (ou coeficiente de proporcionalidade) da relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação correspondente. A viscosidade dinâmica da água diminui com a temperatura, sendo a viscosidade dinâmica da água limpa a 20 °C, sob pressão atmosférica, de $1,00 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$ ou kg/ms .

- Viscosidade cinemática:

Quando a viscosidade dinâmica de um fluido (μ) é dividida pela massa específica (ρ) do mesmo fluido, temos que os termos relativos à massa se cancelam, equação (3),

sendo a viscosidade cinemática (ν) obtida em relação à temperatura (T), conforme equação (4).

$$\nu = \mu/\rho \quad (3)$$

$$\nu = \frac{1,78 \times \frac{10^{-6}m^2}{s}}{[1 + 0,00337T^{\circ}C + 0,0002217T^{\circ}C^2]} \quad (4)$$

A viscosidade da água limpa a 20 °C sob pressão atmosférica é $1,00 \times 10^{-6}m^2/s$.

4.3.2 Classificação dos escoamentos

O escoamento pode ser categorizado de diversas maneiras, dependendo das propriedades predominantes e das equações aplicáveis, conforme a perspectiva de análise. Neste segmento, serão apresentadas de forma concisa algumas classificações do escoamento.

- Tensão Cisalhante:

De acordo com Streeter e Wylie (1980), um fluido é uma substância que mantém uma deformação contínua sob a influência de uma tensão de cisalhamento, expressa como a componente tangencial da força dividida pela área, onde, $\tau = F/A$. A Lei da Viscosidade de Newton descreve a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação resultante, conforme expresso na equação (5):

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (5)$$

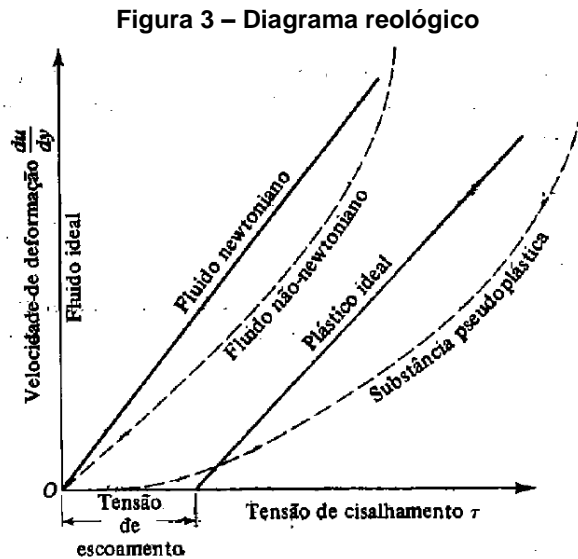
Onde:

τ : tensão de cisalhamento,

μ : viscosidade dinâmica do fluido,

$\frac{du}{dy}$: taxa de deformação por cisalhamento.

Os fluidos podem ser categorizados como newtonianos quando a viscosidade permanece constante, independente da força aplicada ou da taxa de deformação, como é o caso da água. Por outro lado, são considerados fluidos não-newtonianos quando a viscosidade pode variar com a taxa de deformação ou aplicação de forças externas. O diagrama reológico, representado na Figura 3, ilustra as propriedades reológicas de um fluido em relação à tensão de cisalhamento e à taxa de deformação.



Fonte: Streeter e Wylie (1980).

- Pressão reinante:

O escoamento pode ser classificado como forçado, caracterizado por uma pressão diferente da atmosférica, o que requer o fechamento do conduto pelo qual o fluido se desloca. Por outro lado, no escoamento livre, a pressão na superfície do líquido é igual à atmosférica, permitindo que o conduto seja tanto aberto, como no reservatório da PCH Salto Paraopeba, quanto fechado (BAPTISTA E LARA, 2014).

Conforme White (2010), os escoamentos em canais abertos são conduzidos apenas pela gravidade, e o gradiente de pressão na interface com a atmosfera é desprezível, ou seja, o balanço de forças básico em um canal aberto é entre a gravidade e o cisalhamento.

- Regime de Escoamento:

Quanto à direção na trajetória das partículas, o escoamento pode ser classificado conforme o experimento de Reynolds a partir do qual se obteve a equação (6):

$$Re = \frac{U \times d_h}{\nu} \quad (6)$$

Onde:

Re : número de Reynolds,

U : velocidade média do escoamento,

d_h : dimensão geométrica característica (raio hidráulico para escoamentos livres),

ν : viscosidade cinemática.

A partir disso, conforme Baptista e Lara (2014), obtêm-se que o escoamento em conduto livre pode ser classificado como: laminar ($Re < 500$); transição ($500 < Re < 1.000$) e turbulento ($Re > 1.000$). Os escoamentos em canais abertos são geralmente turbulentos.

- Variação no tempo:

O escoamento pode ser considerado em regime permanente, quando não há variação das características de escoamento com o tempo ou variado (não permanente), subdividido conforme a taxa de variação da velocidade e da pressão (BAPTISTA E LARA, 2014). Este estudo do transporte de sedimentos no reservatório da PCH Paraopeba é tratado como um problema de regime não permanente.

- Dimensão:

Os escoamentos podem ser classificados em unidimensionais, quando as variações das grandezas na direção transversal ao escoamento são desprezíveis, como no escoamento em condutos forçados; escoamento bidimensional, a partir do qual se admite que as variações das grandezas podem ser expressas em função de duas coordenadas, ou seja, num plano paralelo ao deslocamento e; tridimensional, sendo

que suas características variam nas três dimensões, exigindo métodos matemáticos mais complexos (BAPTISTA E LARA, 2014).

- Interno ou externo:

Escoamentos completamente envoltos por superfícies sólidas ou dutos são chamados internos, por exemplo, no interior de uma torneira. O escoamento interno de líquidos em que o duto não fica plenamente preenchido, ou seja, onde há uma superfície livre, é denominado escoamento em canal aberto, como em rios e reservatórios, por exemplo. Os escoamentos sobre corpos imersos num fluido não contido são chamados de externos (FOX, PRITCHARD E MCDONALD, 2010).

- Energia:

Conforme White (2011), para condutos livres, a caracterização dos regimes de escoamento quanto à energia é feita com base no adimensional obtido a partir da equação de energia específica, denominado número de Froude, Fr , que é a relação entre a velocidade no canal e a velocidade de propagação de uma pequena onda de perturbação no canal. Para um canal retangular ou muito largo de profundidade constante, ele tem a seguinte forma (eq. (7)):

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gH}} \quad (7)$$

Sendo:

U : velocidade do escoamento,

\sqrt{gH} : velocidade da onda de superfície, onde g é a gravidade, e H é a profundidade da água.

Assim, para $Fr < 1,0$, o escoamento é dito como subcrítico (ou fluvial); $Fr = 1,0$, escoamento crítico e $Fr > 1,0$, escoamento supercrítico (ou torrencial).

- Variação da profundidade da superfície livre:

A classificação principal dos escoamentos em canais abertos depende da variação da profundidade da superfície livre. O escoamento uniforme, onde a profundidade é invariante no espaço ocorre em canais longos e retos com declividade e área constantes. A profundidade normal (y_n) é um parâmetro fundamental em canais com escoamento uniforme (WHITE, 2010).

Nessa condição, conforme Baptista e Lara (2014), a linha energética total, a superfície do líquido e o fundo do canal possuem a mesma declividade e assim, pressupõe-se que o fluido não sofra aceleração, sendo as velocidades equivalentes em todas as seções, correspondendo a uma situação de equilíbrio das forças atuantes no volume de controle. Dessa forma, a velocidade de escoamento correspondente ao escoamento uniforme pode ser expressa pela equação de Manning, Eq. (8), bastante utilizada para cálculos hidráulicos, cuja dificuldade reside na determinação do coeficiente de rugosidade de Manning.

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} I^{1/2} \quad (8)$$

Sendo:

Q: vazão,

A: área molhada,

R_h : raio hidráulico,

I: declividade do fundo,

n: coeficiente de rugosidade de Manning.

O raio hidráulico é obtido por meio da razão entre a área molhada (parte da seção transversal ocupada por líquido) e o perímetro molhado (comprimento relativo ao contato do líquido com o conduto).

Já quando ocorrem variações na declividade, na seção transversal ou obstruções, o escoamento é considerado variado, podendo ser gradualmente variado, quando a

variação ocorre de maneira lenta, ou bruscamente variado, caso for rápida (WHITE, 2010).

O estudo do escoamento gradualmente variado envolve a análise dos perfis de elevação da superfície da água. No caso, da implementação de um barramento no curso d'água, este não somente altera o escoamento local sobre o vertedouro, mas também modifica a distribuição de profundidades do escoamento a montante, gerando as denominadas curvas de remanso, $M-1$, que resultam de uma aplicação direta da forma integral da equação de energia (WHITE, 2010).

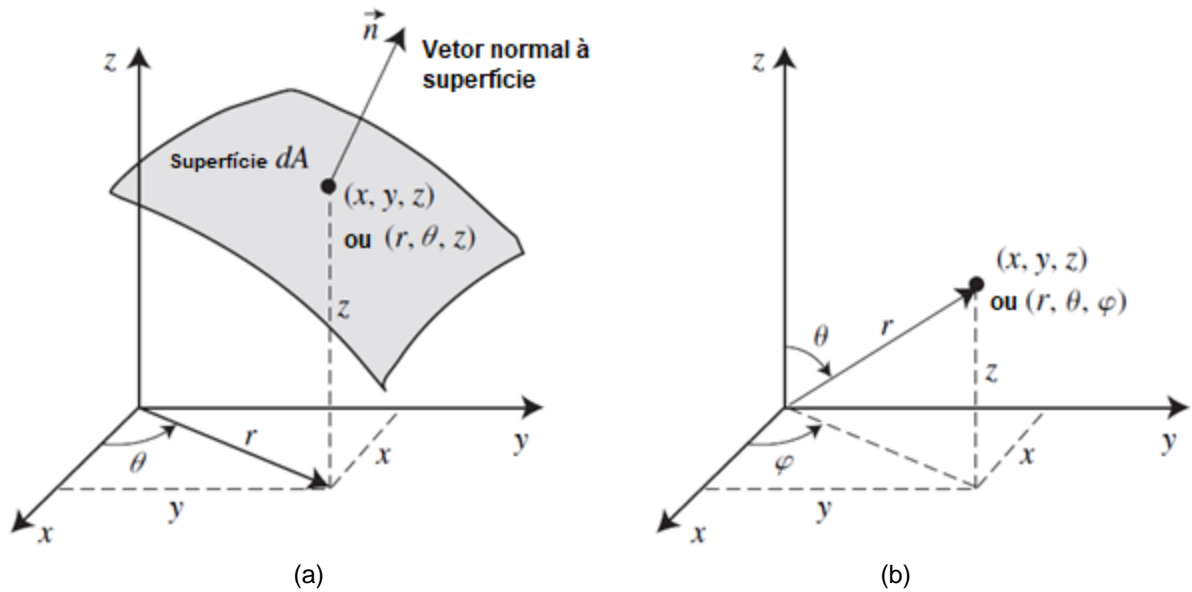
4.3.3 Equações fundamentais

O escoamento de fluidos é modelado pelas leis de conservação da física, expressas nas equações da quantidade de movimento e energia. Analisado sob a perspectiva tridimensional do escoamento, utilizam-se as equações do escoamento dos fluidos conhecidas como equações de Navier-Stokes. Essas equações são aplicáveis a fluidos newtonianos e, com algumas considerações, também se aplicam ao escoamento com transporte de sedimentos.

Conforme delineado por White (2011), a exploração do escoamento dos fluidos pode ocorrer por meio de três abordagens: análise de volume de controle (ou de larga escala), baseada em valores médios ou “unidimensionais” das propriedades nos contornos; análise diferencial ou de pequena escala; e análise dimensional. A análise de pequena escala, ou análise diferencial, refere-se à investigação detalhada de uma região infinitesimal do escoamento. Nesse contexto, as leis fundamentais de conservação são aplicadas a um volume de controle infinitamente pequeno ou, alternativamente, a um sistema fluido infinitesimal. Em ambos os casos, os resultados levam às equações diferenciais cruciais que descrevem o escoamento dos fluidos.

Para representar o escoamento dos fluidos, os três sistemas de coordenadas ortogonais mais comuns são utilizados: (1) cartesianas (x, y, z) ; (2) cilíndricas (r, θ, z) ; e (3) esféricas (r, θ, ϕ) , como ilustrado na Figura 4. Apenas para exemplificar as principais equações, o escoamento dos fluidos será representado no sistema de coordenadas cartesianas.

Figura 4 – Sistema de coordenadas cartesianas e cilíndricas (a) coordenadas esféricas (b)



Fonte: Adaptado de Julien (2010).

A variação na posição do ponto central de um elemento fluido ao longo do tempo é uma medida da sua velocidade. Velocidade é conceituada como a relação entre o deslocamento (D) e o correspondente intervalo de tempo (dt). Trata-se de uma grandeza vetorial que se altera tanto no espaço (x, y, z) quanto no tempo (t). Sua magnitude escalar (v) em um dado instante é expressa pela raiz quadrada da soma dos quadrados de seus componentes ortogonais: $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$. Os componentes diferenciais de velocidade ao longo de uma distância infinitesimal ds (dx, dy, dz) e um incremento de tempo dt como apresentados pelas equações (9) a (11) conforme Julien (2010):

$$dv_x = \frac{\partial v_x}{\partial t} dt + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx + \frac{\partial v_x}{\partial y} dy + \frac{\partial v_x}{\partial z} dz \quad (9)$$

$$dv_y = \frac{\partial v_y}{\partial t} dt + \frac{\partial v_y}{\partial x} dx + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy + \frac{\partial v_y}{\partial z} dz \quad (10)$$

$$dv_z = \underbrace{\frac{\partial v_z}{\partial t} dt}_{\text{local}} + \underbrace{\left(\frac{\partial v_z}{\partial x} dx + \frac{\partial v_z}{\partial y} dy + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \right)}_{\text{convectiva}} \quad (11)$$

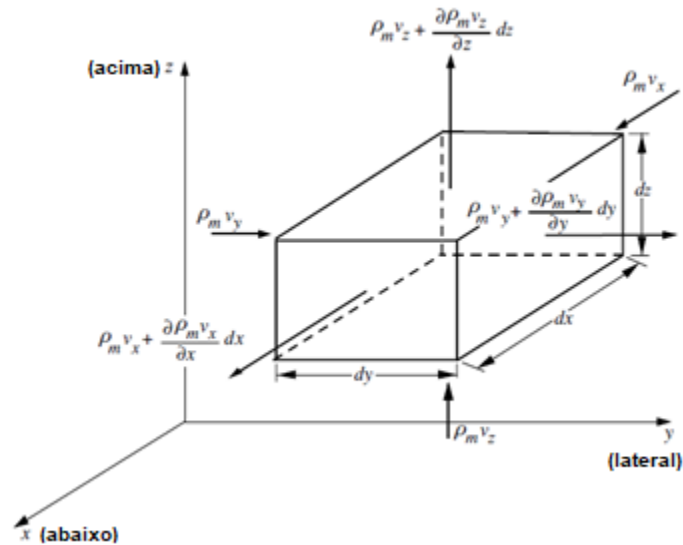
O escoamento é permanente e uniforme quando os termos locais são zero e uniforme quando os termos convectivos são zero (JULIEN, 2010).

Equação da Conservação da massa (ou lei da continuidade)

A equação da continuidade é baseada na lei da conservação da massa, afirmando que a massa não pode ser criada ou destruída, ou seja, a variação da massa no tempo (dm/dt) é igual a zero. A equação da continuidade pode ser expressa tanto na forma diferencial quanto na forma integral no estudo de escoamentos bi e tridimensionais (STREETER E WYLIE, 1980).

A expressão diferencial da equação da continuidade pode ser formulada considerando um volume de controle infinitesimal, preenchido com fluido de massa específica (ρ_m), conforme Julien (2002), representado na Figura 5.

Figura 5 – Elemento infinitesimal de um fluido



Fonte: Adaptado de Julien (2002).

Nesse cenário, com um fluido e uma concentração uniforme de sedimentos, a diferença diferencial entre os fluxos de massa que entram e saem do volume de controle é igual à taxa de aumento da massa interna. Essa relação pode ser expressa em termos das coordenadas cartesianas conforme Julien (2010), equação (12):

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_m v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_m v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_m v_z) = 0 \quad (12)$$

Onde:

ρ_m : densidade do fluido,

t : tempo,

v : vetor de velocidade.

Para escoamentos considerados incompressíveis, ou seja, massa específica constante, como a água, a equação da continuidade de reduz a equação (13):

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

Conforme Julien (2010), para problemas de transporte de sedimentos, as equações de continuidade são idênticas à (12) após a substituição de ρ_m por C_v , conforme equações (14) e (15):

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} + \frac{\partial (C_v v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (C_v v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (C_v v_z)}{\partial z} = C_v \quad (14)$$

Na qual:

$$C_v = \frac{\nabla_s}{\nabla_t} = \frac{m_s}{\rho_s \nabla_t} \quad (15)$$

Onde:

C_v = concentração volumétrica dos sedimentos em suspensão,

∇_s = volume de sólidos,

∇_t = volume total,

m = massa dos sólidos

ρ_s = massa específica dos sedimentos.

É importante lembrar que esta derivação considera apenas fluxos advectivos. No caso do transporte de sedimentos, a difusão e a mistura podem induzir fluxos de sedimentos mesmo quando todas as velocidades são zero. Portanto, esse termo pode incluir os seguintes processos: (1) difusão, mistura e dispersão; (2) mudança de fase da substância (por exemplo, mudança de sólidos dissolvidos para sólidos de partículas, como na floculação); (3) reações químicas que causam mudanças de fase no caso do transporte de metais ou contaminantes; e (4) funções de decaimento de substâncias ou $\lambda_m = 0$ (por exemplo, material radioativo) (JULIEN, 2010).

A equação da continuidade apresentada no manual do FLOW-3D, pacote computacional utilizado no trabalho, para fluidos incompressíveis, considerando o sistema de coordenadas cartesiano e a formulação do método *FAVORTM*, é da seguinte forma (eq. (16)):

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho_m} \quad (16)$$

Sendo (u, v, w) , as componentes de velocidade nas direções das coordenadas $(x, y$ e $z)$ e (A_x, A_y, A_z) , as componentes da área fracionária aberta ao fluxo e R_{SOR} uma fonte de massa.

Quantidade de movimento (2ª lei de Newton):

A segunda lei de Newton descreve que a força resultante que atua sobre um corpo (F), é igual ao produto de sua massa (m), pela aceleração (a): $F = ma$. Assim, o corpo adquirirá uma aceleração na mesma direção e no mesmo sentido da força resultante. Sabendo-se que aceleração é a variação de velocidade no tempo $a = (dv/dt)$, as componentes da aceleração na forma diferencial, no sistema cartesiano, são obtidas diretamente após a divisão dos termos das equações de velocidade, (9), (10) e (11), por dt , como mostrado pelas equações (17) a (19), conforme demonstrado em Julien (2010):

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \quad (17)$$

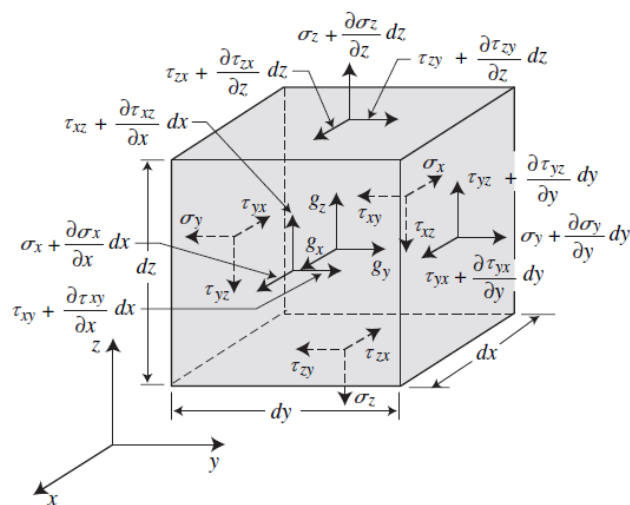
$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \quad (18)$$

$$a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (19)$$

As forças que incidem sobre um elemento cartesiano de fluido e sedimento (dx, dy, dz) são categorizadas como forças internas ou externas e estão ilustradas na Figura 6. As acelerações internas que atuam no centro de massa do elemento, são representadas por g_x, g_y e g_z . Já as forças externas por unidade de área, aplicadas em cada face do elemento, subdividem-se em componentes de tensão normal e tangencial (JULIEN, 2010).

As tensões normais (σ_x, σ_y e σ_z) são positivas quando em tração e, adicionalmente, são exercidas seis tensões de cisalhamento $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$, com duas componentes ortogonais em cada face, sendo que o primeiro subscrito indica a direção normal à face, enquanto o segundo subscrito denota a direção do componente de tensão aplicado (JULIEN, 2010).

Figura 6 – Tensões superficiais em um elemento fluido



Fonte: Julien (2010).

A igualdade entre as tensões $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ e $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, decorre da soma dos momentos das tensões de cisalhamento em torno do centroide. Se essas tensões não fossem idênticas, provocariam uma rotação infinitamente rápida em um volume de fluido elementar. Além disso, o elemento de fluido é considerado em equilíbrio quando a soma das forças por unidade de massa em cada direção x , y e z é equivalente ao componente de aceleração cartesiana correspondente, representado por a_x , a_y e a_z mostrado nas equações (20) a (22) segundo Julien (2010):

$$a_x = g_x + \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (20)$$

$$a_y = g_y + \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (21)$$

$$a_z = g_z + \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \quad (22)$$

As tensões normais podem ser reescritas como uma função da pressão p e das tensões normais adicionais τ_{xx} , τ_{yy} e τ_{zz} que acompanham a deformação (equações (23) a (25), (JULIEN, 2010)):

$$\sigma_x = -p + \tau_{xx} \quad (23)$$

$$\sigma_y = -p + \tau_{yy} \quad (24)$$

$$\sigma_z = -p + \tau_{zz} \quad (25)$$

Dessa forma, as equações de movimento em coordenadas cartesianas, como demonstrado em Julien (2010), podem ser escritas conforme as equações (26) a (28):

$$a_x = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = g_x - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_m} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \quad (26)$$

$$a_y = \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = g_y - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho_m} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \quad (27)$$

$$a_z = \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = g_z - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho_m} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (28)$$

Equações de Navier-Stokes

Uma maneira de obter as equações de Navier-Stokes, como são conhecidas hoje para o sistema cartesiano, é aplicar a lei da viscosidade de Newton, conforme a equação (5), nas equações (26), (27) e (28) da quantidade do movimento, resultando nas equações (29) a (31), conforme Julien (2010):

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = g_x - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_m}{\rho_m} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \quad (29)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = g_y - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_m}{\rho_m} \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \quad (30)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = g_z - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu_m}{\rho_m} \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (31)$$

As equações de Navier-Stokes para as componentes de velocidade do fluido (u , v , w) nas três direções de coordenadas com alguns termos adicionais utilizadas no FLOW-3D, conforme manual FLOW-3D (2023), são as seguintes descritas nas equações (32) a (34):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho_m V_F} (u - u_w - u_s) \quad (32)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho_m V_F} (v - v_w - v_s) \quad (33)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho_m V_F} (w - w_w - w_s) \quad (34)$$

Sendo que:

(f_x, f_y, f_z) são acelerações viscosas,

(b_x, b_y, b_z) são as perdas de fluxo em meios porosos ou através de placas perfuradas porosas, e os termos finais contabilizam a injeção de massa em uma fonte representada por um componente geométrico,

O termo $U_w = (u_w, v_w, w_w)$ é a velocidade do componente de fonte, que geralmente será diferente de zero para uma fonte de massa em um Modelo Geral de Objetos Móveis (GMO). (Não se aplica ao caso em estudo).

O termo $U_s = (u_s, v_s, w_s)$ é a velocidade do fluido na superfície da fonte em relação à própria fonte. É computado em cada volume de controle conforme equação (35) (FLOW-3D, 2023):

$$U_s = \frac{dQ}{\rho_Q dA} n \quad (35)$$

onde:

dQ : variação da vazão,

ρ_Q : densidade do fluido de entrada,

dA : variação da área da superfície na célula, e

n : vetor normal à superfície.

Outras especificações, bem como a representação em coordenadas cilíndricas das equações fundamentais podem ser verificados no manual FLOW-3D (2023).

4.4 Método de discretização

A solução numérica das equações de conservação é alcançada por métodos numéricos como: Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Elementos Finitos (MEF) e Métodos Espectrais. O objetivo de um método de discretização é aproximar as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas para as variáveis do problema. Estas são obtidas em pontos discretos no espaço e no tempo (VERSTEEG E MALALASEKRA, 2007). Dentre os métodos existentes, o Método dos Volumes Finitos (MVF), é uma formulação especial de diferenças finitas empregada

em modelos mais consolidados, como no *software* FLOW-3D HYDRO®, utilizado neste estudo.

4.4.1 Breve panorama

Segundo Maliska (1995), os desafios relacionados ao escoamento de fluidos são altamente não-lineares. Nesse contexto, os pesquisadores do Método dos Volumes Finitos (MVF) concentraram-se na superação das não-linearidades dos termos convectivos e nas dificuldades de acoplamento entre as equações de conservação. Inicialmente, o MVF teve seu desenvolvimento ancorado em sistemas coordenados ortogonais, como o cartesiano, o cilíndrico e o esférico.

Em contrapartida, o Método dos Elementos Finitos (MEF) utilizava malhas não-estruturadas, permitindo a resolução de problemas em geometrias complexas. Contudo, a aplicação do MEF foi retardada devido à crença de que a equação diferencial a ser resolvida necessitava de um princípio variacional, ausente na equação de Navier-Stokes (MALISKA, 1995).

Diversos problemas, incluindo o tratamento de geometrias complexas, motivaram pesquisas para aprimorar o MVF. Observando fisicamente cada termo da equação diferencial, métodos mais robustos foram desenvolvidos. A capacidade de associar interpretação física com a matemática influenciou a transição dos pesquisadores para o MVF. Importantes desenvolvimentos ocorreram no MVF, inicialmente em coordenadas ortogonais, especialmente cartesianas (MALISKA, 1995).

Uma transformação significativa, impulsionada por avanços computacionais, ocorreu na década de 70. Nesse período, os sistemas coordenados ortogonais convencionais deram lugar a sistemas coordenados generalizados coincidentes com a fronteira do domínio, permitindo ao MVF resolver problemas em geometrias irregulares. A partir daí, o MVF experimentou um notável crescimento ao empregar coordenadas coincidentes com a fronteira. Praticamente todos os principais pacotes no mercado para solução de problemas de escoamento de fluidos com transferência de calor passaram a utilizar coordenadas generalizadas no âmbito do MVF (MALISKA, 1995).

Simultaneamente, o MEF começou a empregar outras funções de interpolação para tratar adequadamente termos convectivos não-lineares. Funções do tipo Petrov-Galerkin, ponderando entre efeitos difusivos e convectivos, semelhantes a esquemas híbridos em volumes finitos, impulsionaram o avanço do MEF na área de escoamento de fluidos. Formulações posteriores permitiram ao MEF tratar problemas de fluidos minimizando os efeitos de difusão numérica (MALISKA, 1995).

A partir disso, um grande esforço de pesquisa dedicado ao desenvolvimento de métodos em volumes finitos usando malhas não-estruturadas, semelhantes às usadas em elementos finitos, se iniciou. Ambos os métodos (MVF e MEF) estão resolvendo problemas altamente convectivos em geometrias complexas, indicando uma forte semelhança em termos de generalidade. Do ponto de vista matemático, todos os métodos numéricos podem ser derivados do método dos resíduos ponderados, usando diferentes funções peso. Na prática, o que se observa são diferentes níveis de experiência dos métodos para diferentes problemas (MALISKA, 1995).

No contexto dos pacotes comerciais, o MVF é preferido devido à sua robustez, especialmente em problemas de fluidos, onde a conservação em nível discreto é crucial. Além disso, a facilidade de depuração de programas computacionais representa uma vantagem significativa. Existem diversas variantes do MVF, abrangendo métodos em coordenadas curvilíneas e outras que utilizam predominantemente malhas não estruturadas (MALISKA, 2004).

Conforme Maliska (2004), um método que ganhou destaque na última década é o método dos elementos no contorno (BEM — Boundary Element Method). Sua vantagem reside na capacidade de tratar apenas a discretização da fronteira, sem a necessidade de discretizar o domínio interno. No entanto, apesar de atrativo, o BEM ainda não atende plenamente às demandas dos problemas complexos resolvidos por outros métodos.

4.4.2 Método dos Volumes Finitos (MVF)

Conforme Maliska (1995), existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas no método dos volumes finitos. A primeira é a realização de balanços da propriedade a ser analisada nos volumes elementares, ou volumes finitos, e a

segunda é, partindo-se da equação diferencial na forma conservativa (aquela em que, na equação diferencial, os fluxos aparecem dentro do sinal da derivada), integrá-la sobre o volume elementar, no espaço e no tempo. Esses processos são equivalentes, uma vez que, para derivar as equações diferenciais, é necessário inicialmente realizar um balanço em um volume infinitesimal, seguido pelo processo de limites para obter a equação diferencial.

A integração para todos os volumes elementares resulta no sistema de equações algébricas. A preferência por obter equações aproximadas integrando a equação diferencial advém da complexidade de alguns balanços, como o de quantidade de movimento, que requer a identificação e soma de todas as tensões atuantes no volume de controle, tornando-se uma tarefa desafiadora, especialmente para volumes irregulares (Maliska, 1995).

Versteeg e Malalasekra (2007) subdividem o algoritmo numérico do MVF em três etapas principais:

1. Integração das equações que modelam o escoamento de fluido sobre todos os volumes de controle (finitos) do domínio.
2. Discretização - conversão das equações integrais resultantes em um sistema de equações algébricas.
3. Solução das equações algébricas por um método iterativo.

A primeira etapa, a integração sobre os volumes de controle, diferencia o método dos volumes finitos de todas as outras técnicas de CFD. A conservação de uma variável de fluxo geral ϕ , como uma componente de velocidade ou entalpia, num volume de controle finito pode ser expressa como um equilíbrio entre vários processos que tendem a aumentá-la ou diminuí-la. Em termos simples, há uma busca pela conservação exata dessas propriedades ao longo do domínio de estudo (VERSTEEG E MALALASEKRA, 2007).

No que tange a discretização, os códigos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) contêm técnicas adequadas para o tratamento dos principais fenômenos de

transporte, como convecção (transporte devido ao escoamento do fluido) e difusão (transporte devido a variações de ϕ de ponto a ponto), bem como para os termos de origem (associados à criação ou destruição de ϕ) e a taxa de variação em relação ao tempo. Os fenômenos físicos subjacentes são complexos e não lineares, exigindo uma abordagem iterativa para a solução (VERSTEEG E MALALASEKRA, 2007).

Os procedimentos de solução mais comuns envolvem a resolução linha por linha das equações algébricas utilizando o algoritmo *TDMA (tri-diagonal matrix algorithm)* e o algoritmo *SIMPLE* para garantir a correta ligação entre pressão e velocidade. Além disso, códigos comerciais oferecem opções mais avançadas, como técnicas iterativas de ponto *Gauss-Seidel* com aceleradores *multigrid* e métodos de gradiente conjugado (VERSTEEG E MALALASEKRA, 2007).

4.5 Transporte de sedimentos

4.5.1 Contexto

O transporte de sedimentos em corpos d'água, conforme abordado por Carvalho (2008), engloba partículas derivadas de rochas sujeitas a diversos processos de transporte. De acordo com Batista e Lara (2014), esses processos incluem sedimentação, onde as partículas se depositam devido à ação da gravidade, desagregação, caracterizada pelo desprendimento de partículas sólidas, e erosão, que ocorre quando partículas desagregadas são deslocadas pela superação das forças hidrodinâmicas exercidas pelo fluxo. Esses fenômenos são influenciados por fatores como características das partículas, condições locais e características do escoamento.

O processo natural de transporte de sedimentos envolve uma busca por uma condição de equilíbrio. Lane (1955) define o equilíbrio morfológico como a situação em que a capacidade do curso d'água de transportar sedimentos é igual à quantidade fornecida pela bacia de drenagem. Embora esse equilíbrio seja momentâneo e sujeito a flutuações, muitos leitos de cursos d'água podem ser considerados em equilíbrio ao longo de períodos históricos longos.

A equação (36), conforme BAPTISTA E LARA (2014), é proposta para analisar qualitativamente problemas de morfologia em cursos d'água:

$$Q_s d_m \propto QI \quad (36)$$

Q_s : descarga do material sólido,

d_m : diâmetro médio das partículas do leito,

Q : vazão do rio,

I : declividade do leito.

Essa equação indica que alterações em uma variável exigem ajustes em outras para restaurar o equilíbrio. Embora não seja uma equação matemática exata para valores quantitativos, ela é valiosa para destacar qualitativamente as mudanças em um curso d'água quando uma variável é modificada (BAPTISTA E LARA, 2014).

O trabalho de Vale et al. (2013), aplica equações de equilíbrio morfológico propostas por Julien (1988, 1989) ao trecho fluvial do reservatório da PCH Salto Paraopeba, cujos resultados indicaram boa aderência com a geometria atual do reservatório, que se encontra totalmente assoreado e já em equilíbrio morfodinâmico.

Devido à complexidade do fenômeno, as diversas formas de transporte são abordadas separadamente, pois ainda não há compreensão suficiente para proporcionar uma explicação completa e inter-relacionada (CARVALHO, 2008). Essa segregação do transporte de sedimentos varia entre diferentes autores.

Carvalho (2008) apresenta três formas distintas de definição do transporte de sedimentos: I) Carga Sólida de Arrasto, onde as partículas rolam ou escorregam ao longo do leito do rio; II) Carga Sólida Saltante, as partículas pulam devido à correnteza ou ao impacto com outras partículas; e III) Carga Sólida em Suspensão, onde partículas são sustentadas pelas componentes verticais do fluxo turbulento enquanto são transportadas pelas componentes horizontais, permanecendo em suspensão na corrente acima do leito.

Já Baptista e Lara (2014) classificam o transporte sólido em: I) Descarga de fundo, onde as partículas mais pesadas deslocam-se no fundo por rolamento, deslizamento ou saltação; II) Descarga em suspensão, partículas mais leves são transportadas ao

longo de todo o fluido em escoamento; e III) Transporte em solução, forma menos importante no âmbito da morfologia fluvial, que corresponde ao transporte com o material sólido dissolvido no meio líquido.

Neste estudo, o transporte de sedimentos será abordado segundo a referência de Julien (2010), que distingue entre I) Transporte por arrasto (ou descarga de fundo), referindo-se à quantidade de sedimentos que se move no leito e II) Transporte por suspensão, onde partículas mais finas são suspensas quando as flutuações de velocidade turbulentas são suficientemente grandes para mantê-las dentro da massa de fluido sem contato frequente com o leito.

4.5.2 Caracterização do sedimento

O sedimento pode ser caracterizado em função de uma única partícula sólida, em função da mistura de sedimentos e do sedimento em suspensão. Algumas das principais propriedades físicas dos sedimentos serão detalhadas na sequência, conforme Julien (2010).

- Massa específica do sedimento:

A densidade de massa de uma partícula sólida, também conhecida como massa específica do sedimento (ρ_s) representa a massa sólida por unidade de volume. Sua variação com a temperatura é insignificante e, na maioria dos cálculos, é considerada constante.

- Peso específico do sedimento:

O peso específico da partícula (γ_s) corresponde ao peso sólido por unidade de volume de sólido, sendo igual ao produto da massa específica de uma partícula sólida (ρ_s) pela aceleração gravitacional (g).

- Gravidade específica:

A razão entre o peso específico de uma partícula sólida e o peso específico do fluido a uma temperatura de referência padrão define a gravidade específica (G). A

gravidade específica é uma proporção adimensional de pesos específicos e, portanto, seu valor permanece independente do sistema de unidades, conforme equação (37):

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma} = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (37)$$

- Tamanho do sedimento:

A característica física mais significativa de uma partícula de sedimento é o seu tamanho. O tamanho das partículas (d_s) pode ser determinado de várias maneiras; diâmetro nominal, que se refere ao diâmetro de uma esfera que possui o mesmo volume da partícula, geralmente medido pelo volume deslocado quando a partícula está submersa; diâmetro da peneira que corresponde ao comprimento mínimo da abertura quadrada da peneira por onde uma partícula pode passar e; diâmetro de queda que é o diâmetro de uma esfera com a mesma velocidade terminal de sedimentação na água a 24 °C e uma gravidade específica equivalente.

- Esfericidade:

A esfericidade de uma partícula, ou fator de forma, (S_p) é uma medida que descreve quão próxima à forma da partícula é de uma esfera perfeita. Ela pode ser descrita por medições dos comprimentos, mais longos: eixo l_a , o intermediário l_b e o eixo mais curto l_c , eq.(38).

$$S_p = \left(\frac{l_a l_c}{l_a^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (38)$$

- Coeficiente de forma:

O coeficiente de forma Corey (C_0) é uma medida adimensional que relaciona a permeabilidade de um meio poroso à sua esfericidade média e pode ser obtido pela equação (39):

$$C_0 = \frac{l_c}{\sqrt{l_a l_b}} \quad (39)$$

- Curva granulométrica:

A distribuição do tamanho das partículas, também conhecida como curva granulométrica, representa a porcentagem em peso do material que é mais fino do que um tamanho de sedimento específico. O tamanho de grão médio, denominado d_{50} , corresponde ao tamanho em que 50% do peso do material é mais fino. De maneira semelhante, d_{90} e d_{10} são valores granulométricos que indicam os tamanhos para os quais 90% e 10% do material é mais fino, respectivamente.

- Ângulo de repouso:

O ângulo de repouso (φ) é uma propriedade importante da mistura de sedimentos submersa. O ângulo de repouso é definido como a inclinação lateral, em relação a horizontal, ou um cone de material sob condição de deslizamento incipiente, ou seja, é o ângulo crítico de uma partícula em uma superfície, no qual o movimento ocorre. Uma partícula específica não necessariamente tem um valor único de ângulo de repouso, pois, depende da interação da partícula com a superfície de contato.

- Concentração volumétrica:

A concentração volumétrica de sedimentos (C_v) de uma suspensão é definida como o volume de sólidos (V_s) sobre o volume total (V_t), eq. (40).

$$C_v = \frac{V_s}{V_t} = \frac{V_s}{V_s + V_v} \quad (40)$$

4.5.3 Resistência ao escoamento

A determinação da resistência ao escoamento é um problema de difícil solução e uma das abordagens adotadas é a composição de dois tipos de resistência: a superficial e a de forma. A primeira é relacionada à superfície do canal plano, coberto pelos grãos dos sedimentos. A segunda é provocada pelas formas do leito (BAPTISTA E LARA, 2014).

Conforme Baptista e Lara (2014), a equação de Manning é amplamente utilizada na avaliação do escoamento em canais com superfície livre, tanto em regime uniforme

quanto para leito móvel. Nestes casos, o coeficiente " n " é a soma de " n_s " (devido aos sedimentos) e " n_f " (devido à forma do leito fluvial) e com base na equação de Meyer, Peter e Muller (1948), considerando o fundo plano, é possível calcular o valor de " n_s " em função do diâmetro do sedimento, como indicado pela equação (41). Já para leitos com rugas ou dunas, o coeficiente de Manning pode assumir valores bastantes superiores.

$$n_s = \left(\frac{d_{90}}{26} \right)^{1/6} \quad (41)$$

Sendo:

d_{90} : diâmetro do sedimento para o qual 90% da mistura é mais fina,

n_s : coeficiente de rugosidade de Manning, devido aos sedimentos.

4.5.4 Velocidade de queda das partículas

A velocidade de queda do sedimento é de extrema importância no estudo do transporte de sedimentos e é fortemente influenciada pelos seguintes fatores, conforme Dey (2014):

- Tamanho e forma das partículas:

As partículas maiores tendem a cair mais rapidamente do que as menores, uma vez que experimentam menos resistência do fluido. Além disso, a forma das partículas também afeta a resistência ao fluxo; partículas mais aerodinâmicas ou com menor rugosidade podem cair mais rapidamente do que partículas com formas irregulares ou superfícies rugosas.

- Rugosidade da superfície da partícula:

A rugosidade da superfície das partículas influencia a resistência ao fluxo, afetando sua velocidade de queda. Conforme Anderson (2011), a superfície rugosa de uma partícula modifica o comportamento da camada limite ao redor dela. Em uma superfície lisa, a camada limite pode permanecer laminar por mais tempo antes de se

tornar turbulenta. Em uma superfície rugosa, a camada limite pode se tornar turbulenta mais rapidamente, aumentando a resistência ao movimento da partícula. Superfícies mais rugosas aumentam a resistência ao escoamento devido à maior turbulência e perturbações no fluido, resultando em um aumento no coeficiente de arrasto. Este aumento na resistência reduz a velocidade de queda das partículas.

- Viscosidade do fluido:

A viscosidade do fluido, neste caso a água, é um fator crítico. Fluidos mais viscosos oferecem maior resistência ao movimento das partículas de sedimento, o que tende a reduzir a velocidade de queda.

- Condições do fluxo:

As condições do fluxo, como a velocidade da água e a turbulência, desempenham um papel importante. Em um fluxo rápido e turbulento, as partículas de sedimento podem ser mantidas em suspensão por mais tempo, o que diminui sua taxa de sedimentação. Em contraste, em um fluxo mais lento e laminar, as partículas tendem a sedimentar mais rapidamente.

A velocidade é obtida por meio de experimentos ou por fórmulas empíricas e pode ser determinada considerando se uma partícula é esférica ou natural, conforme Dey (2014):

Velocidade de queda para uma partícula esférica:

Uma partícula em queda livre atinge seu terminal velocidade de queda (w_s) quando a força de gravidade submersa (F_G) da partícula é igual à força de arrasto ascendente (F_D) e assim, para uma partícula esférica caindo com uma velocidade de queda terminal em uma coluna de água, obtém-se a seguinte equação (42):

$$\Delta\rho g \frac{\pi}{6} d^3 = C_d \frac{\rho}{2} w_s^2 \frac{\pi}{4} d^2 \rightarrow w_s = \left(\frac{4 \Delta\rho g d}{3 C_d} \right)^{0,5} \quad (42)$$

Onde:

$\Delta: \rho_s - 1,$

ρ_s : densidade do sedimento,

ρ : densidade do fluido,

d : diâmetro da partícula,

C_d : coeficiente de arrasto.

Stokes definiu o coeficiente de arrasto, C_d , baseando-se no número de Reynolds da partícula, Re_p , e nas equações de movimento de Navier-Stokes, utilizando como auxílio uma função de cisalhamento e negligenciando todos os termos de inércia, conforme as seguintes equações (43) e (44):

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad (43)$$

$$Re_p = \frac{w_s \times d}{\nu} \quad (44)$$

Sendo:

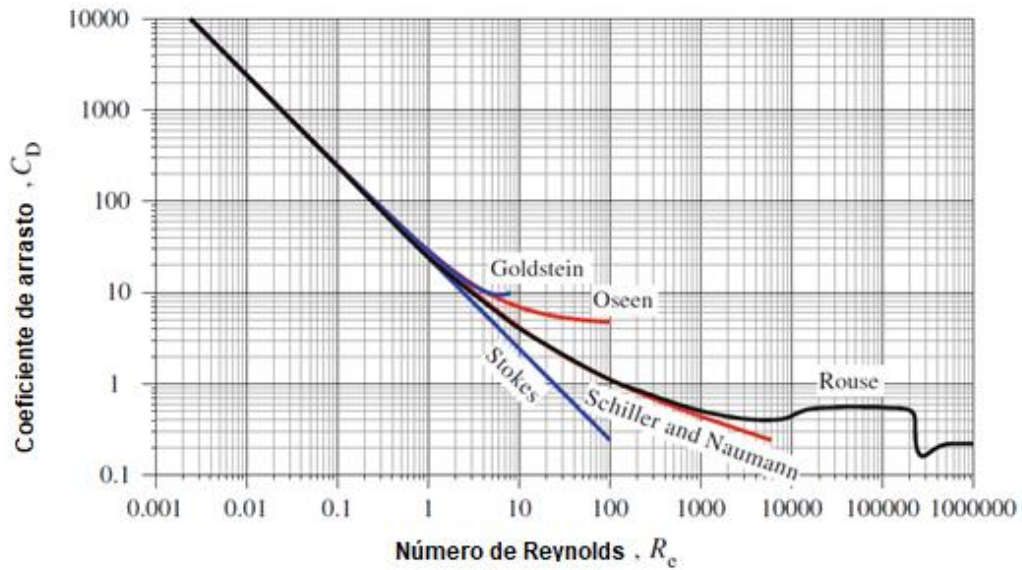
w_s : velocidade de queda da partícula,

d : diâmetro da partícula em queda,

ν : viscosidade cinemática do fluido.

Contudo, a solução de Stokes (1851) foi desenvolvida para pequenas partículas esféricas, com diâmetro igual ou inferior a 1 mm, e para $Re_p \ll 1$, ou seja, para fluxo sub-laminar. Outros autores incorporaram fatores nessa relação com base em dados experimentais. Rouse (1938) usou estes dados disponíveis para preparar uma curva $C_d \times Re_p$ para a estimativa da velocidade terminal de queda de uma esfera, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds da partícula



Fonte: Adaptado de Dey (2014).

Velocidade terminal de queda de partículas de sedimentos naturais:

As partículas naturais não são esféricas e diversas modificações na equação de velocidade de queda e coeficiente de arrasto foram propostas. Rubey (1933) foi o primeiro a introduzir uma fórmula para a determinação de velocidades de queda de partículas com diâmetros maiores. O coeficiente de arrasto seria (eq. (45)):

$$\Delta C_D = 2 + \frac{24}{Re_p} \quad (45)$$

A equação da velocidade de queda de Rubey (1933) é dada pela equação (46):

$$\omega = \frac{1}{d_s} \left[\sqrt{\frac{2g}{3} (G - 1) d_s^3 + 36v^2} - 6v \right] \quad (46)$$

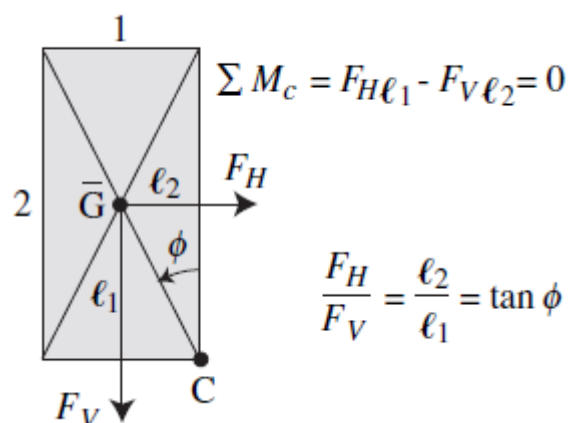
Ao longo do tempo, vários pesquisadores propuseram uma variedade de relações semi-teóricas e empíricas para a velocidade terminal de queda de partículas de sedimentos, levando em consideração o fator de forma (S_p) das partículas, as quais podem ser encontradas na literatura.

4.5.5 Início do movimento dos sedimentos

A determinação do início do movimento dos sedimentos em um curso d'água, ou mais precisamente, da tensão de arrasto necessária para condições críticas de escoamento, é um fenômeno complexo e estocástico. Geralmente, essa determinação é realizada utilizando o diagrama originalmente proposto por Shields (1936), baseado em um número limitado de experimentos que levam em consideração o parâmetro adimensional de Shields (que relaciona a tensão de cisalhamento crítica, o peso específico dos sedimentos e do fluido e o diâmetro característico dos sedimentos) e o número de Reynolds da partícula (envolvendo a velocidade de atrito crítico, o diâmetro característico dos sedimentos e a viscosidade dinâmica do fluido).

Conforme Julien (2010), para materiais granulares, o ângulo de repouso demonstra variações empíricas relacionadas ao tamanho e à angularidade dos grãos. A Figura 8 ilustra a aplicação de uma força de arrasto FD , agindo pelo centro de gravidade de uma partícula de peso W em uma superfície horizontal. O início do movimento é definido como a magnitude da força horizontal $FH = FD$, a qual coloca a partícula em movimento inicial. Esse ponto é determinado quando a soma dos momentos atuando na vertical, $FV = W$, é igual a zero. Portanto, é importante observar que a razão das forças se torna igual a $\tan \phi$.

Figura 8 – Soma dos momentos



Fonte: Julien (2010).

A ação do fluido ao redor de partículas sedimentares exerce forças que tendem a iniciar o movimento das partículas. A força resistente é caracterizada pelo peso submerso das partículas. As condições limítrofes ocorrem quando os momentos

hidrodinâmicos de forças atuando em uma única partícula equilibram os momentos resistivos de força. Define-se, assim, um parâmetro adimensional, chamado parâmetro de Shields, que corresponde à tensão de cisalhamento adimensional conforme equação (47):

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma_m)d_s} = \frac{\rho_m u_*^2}{(\gamma_s - \gamma_m)d_s} \quad (47)$$

onde:

τ_0 : tensão de cisalhamento limite,

u_* : velocidade de cisalhamento,

γ_s : peso específico do sedimento,

γ_m : peso específico da mistura de fluido,

d_s : tamanho da partícula.

Devido à análise na Figura 8, o valor crítico do parâmetro de Shields τ_{*c} correspondente ao início do movimento ($\tau_0 = \tau_c$) e depende da $\tan \varphi$.

Além do ângulo de repouso, deve-se considerar o número de Reynolds de cisalhamento da partícula, equação (48), e a razão entre o tamanho do sedimento e a espessura da camada laminar, d_s/δ , equação (49):

$$Re_* = \frac{u_* d_s}{\nu_m} \quad (48)$$

$$\delta = \frac{11.6 \nu_m}{u_*} \quad (49)$$

Onde:

ν_m : viscosidade cinemática da mistura,

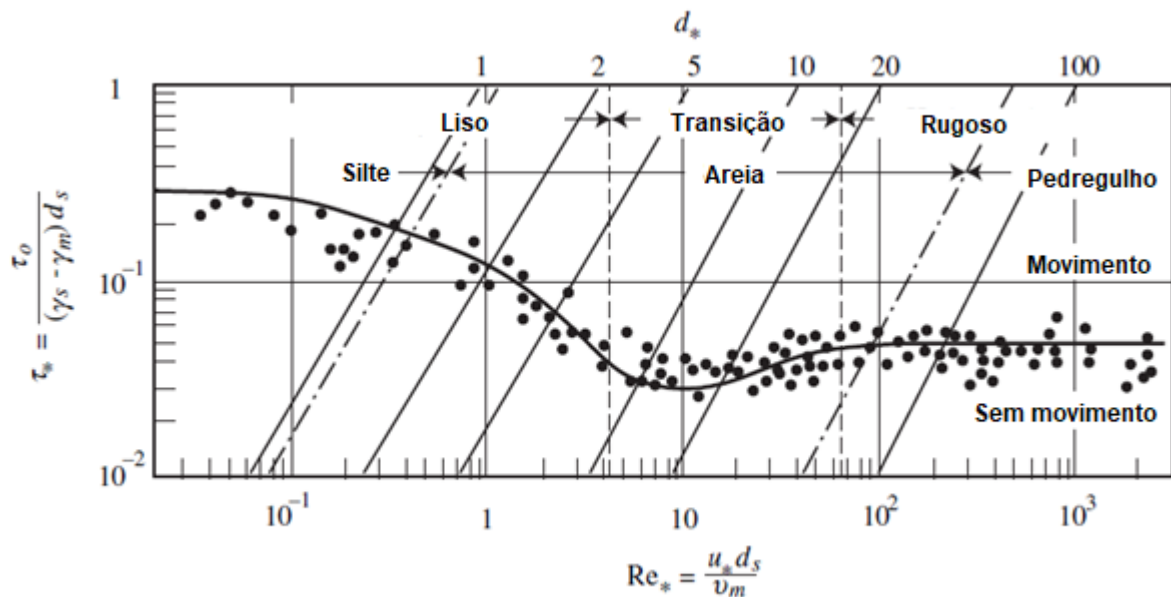
u_* : velocidade de cisalhamento,

d_s : tamanho da partícula.

A forma da partícula e a razão de sustentação para arrasto também devem ser consideradas.

Julien (2010) menciona que Duboys (1879) foi o primeiro a derivar o parâmetro de tensão de cisalhamento adimensional e definiu sua proporcionalidade com $\tan \varphi$. Shields (1936) estabeleceu a relação com Re_* , seus primeiros experimentos foram realizados com Âmbar, Lignite, Granito e Barita. Conforme outros experimentos, diferentes autores têm modificado o primeiro diagrama proposto por Shields. Na Figura 9, é apresentada o diagrama de Shields modificado, considerando dados experimentais de Shields, de Yalin e Karahan (1979), e de Whitehouse et al. (2000).

Figura 9 – Diagrama de Shields para materiais granulares



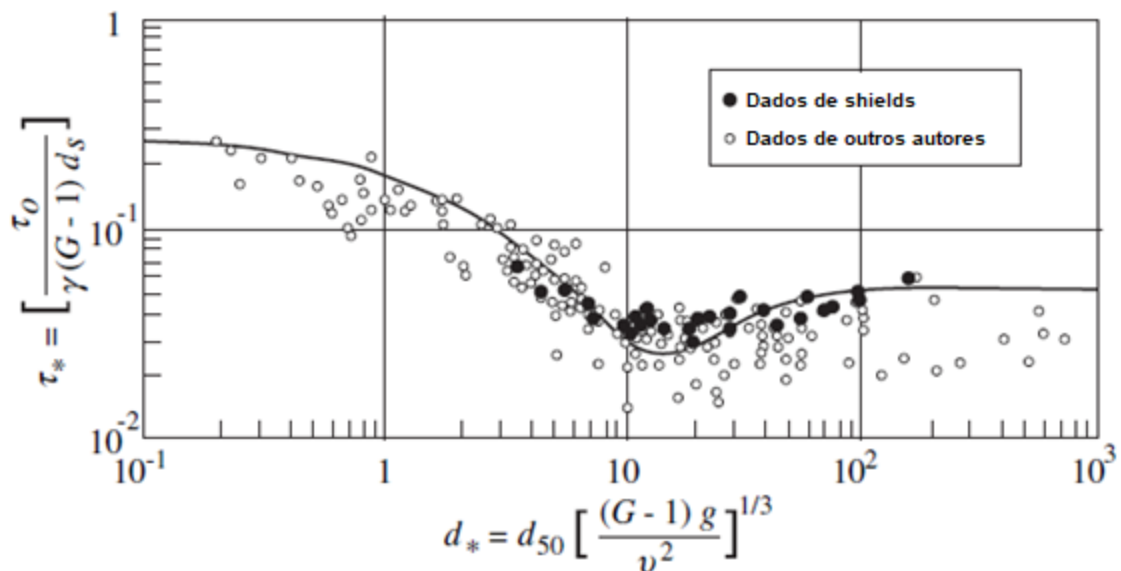
Fonte: Adaptado de Yalin e Karahan (1979 apud JULIEN, 2010).

Conforme Julien (2010), uma vez que a velocidade de cisalhamento u_* aparece tanto no parâmetro de Shields quanto no número de Reynolds da partícula, é necessário um procedimento iterativo para resolver o diagrama de Shields. É prático substituir a abscissa do diagrama de Shields após eliminar a velocidade de cisalhamento de Re_{p*} e definir o diâmetro da partícula adimensional d_* a partir de $d_*^3 = \frac{Re_*^2}{\tau_*}$. Assim, a

abscissa do diagrama de Shields pode ser substituída pelo diâmetro da partícula adimensional d_* , resultando no diagrama de Shields modificado na Figura 10.

Apesar do diagrama de Shields ser utilizado como critério para início do movimento, há diversas críticas devido às considerações adotadas para sua determinação, como: desconsiderar as forças de sustentação (existem outras forças além das forças cisalhantes); considerar que o movimento acontece na subcamada viscosa; usar parâmetros adimensionais τ_* e Re_* dependentes um do outro etc. Yang (1973) aponta que estes fatores sugerem que o diagrama de Shields não pode ser considerado um critério desejável para o início de movimento.

Figura 10 – Diagrama de Shields modificado



Fonte: Adaptado de Julien (2010).

Os valores críticos do parâmetro de Shields τ_{*c} podem ser aproximados pelas equações (50) e (51), como demonstrado em Julien (2010):

$$\tau_{*c} \approx 0,3e^{-\frac{d_*}{3}} + 0,06\tan\phi\left(1 - e^{-\frac{d_*}{20}}\right) \quad (50)$$

$$d_* = d_s \left(\frac{(G-1)g}{v_m^2} \right)^{1/3} \quad (51)$$

Diversas contribuições para aprimorar o critério de Shields surgiram ao longo do tempo, sendo notável o trabalho de Soulsby e Whitehouse (1997), que introduziram

outro parâmetro adimensional (relacionado à gravidade, densidade relativa do grão, viscosidade cinemática e diâmetro médio).

O FLOW-3D permite que o parâmetro de Shields possa ser especificado pelo usuário ou por meio da equação de Soulsby-Whitehouse. Além disso, o parâmetro crítico Shields pode ser modificado para superfícies inclinadas para incluir o ângulo de repouso (FLOW-3D, 2023).

4.5.6 Quantificação do transporte de sedimentos

Conforme Baptista e Lara (2014), a complexidade dos fenômenos relacionados ao transporte de sedimentos impossibilita estabelecer uma equação abrangente nas estimativas de carga sólida. A quantificação adequada desse transporte em um curso d'água requer uma extensa série de dados de monitoramento, geralmente indisponíveis, resultando em incertezas significativas. Diversas equações e modelos, principalmente baseados em dados empíricos, foram desenvolvidos para avaliar diferentes formas de transporte de sedimentos, com limitações de validade. A preferência por dados monitorados ou expressões regionalizadas, quando disponíveis, proporciona uma representação mais precisa das características locais.

Transporte por arrasto

A descarga sólida de material do leito corresponde a descarga de arrasto e uma parcela da descarga em suspensão, cuja composição é de material do leito. As fórmulas desenvolvidas para esse cálculo correspondem à descarga total do sedimento grosso até areias ($d > 0,062 \text{ mm}$). Para obtenção da descarga sólida total há a necessidade do conhecimento da concentração e da curva granulométrica do sedimento em suspensão (CARVALHO, 2008). O cálculo da descarga de arrasto e do material do leito pode ser realizado de forma indireta, usando equações empíricas.

Segundo Julien (2010), partículas não coesas do leito entram em movimento assim que a tensão de cisalhamento aplicada sobre o material do leito excede a tensão crítica de cisalhamento. Geralmente, partículas de silte e argila entram em suspensão, enquanto partículas de areia e cascalho rolam e deslizam em uma camada fina próxima ao leito chamada camada de leito. O transporte de carga de leito, ou carga

de contato, refere-se ao transporte de partículas de sedimento que frequentemente mantêm contato com o leito e pode ser tratado como um problema determinístico ou probabilístico. Métodos determinísticos foram propostos por DuBoys (1879) e Meyer-Peter Müller (1948); métodos probabilísticos foram desenvolvidos por Kalinske (1942) e Einstein (1950).

Destaca-se a equação empírica de Meyer-Peter & Muller (1948), amplamente utilizada e válida para areias e pedregulhos com diâmetros compreendidos entre 0,4 e 30 mm. Carvalho (2008), apresenta sua fórmula original (eq. (52) a (55)):

$$\gamma \frac{Q_s}{Q} \left(\frac{K_{st}}{K_r} \right)^{3/2} HS = 0,047 \gamma_s d_m + \left(\frac{\gamma}{g} \right)^{1/3} q_{sa}^{2/3} \quad (52)$$

Na qual,

$$K_{st} = \frac{1}{n} \quad (53)$$

$$K_r = \frac{26}{(d_{90})^{1/6}} \quad (54)$$

$$\gamma'_s = \gamma_s - 1 \quad (55)$$

Sendo:

γ : peso específico da água,

Q_s : parte da descarga líquida que influencia no leito,

Q : descarga líquida total,

K_{st} : coeficiente de rugosidade do leito de Strickler, igual ao inverso do coeficiente de rugosidade de Manning n ,

K_r : coeficiente de rugosidade da partícula devido à força de cisalhamento,

d_{90} : diâmetro da partícula para o qual 90% dos sedimentos do leito são mais finos,

H : profundidade média,

S : gradiente de energia ou declividade da linha energética,

γ'_s : peso específico do sedimento submerso,

γ_s : peso específico do sedimento,

d_m : diâmetro médio da composição do material do leito,

g : aceleração da gravidade,

q_{sa} : descarga sólida do leito,

n : coeficiente de rugosidade de Manning.

Transporte por suspensão

As partículas mais finas são colocadas em suspensão quando as flutuações de velocidade turbulentas são suficientemente grandes para manter as partículas dentro da massa de fluido sem contato frequente com o leito (JULIEN, 2010).

Conforme Yang (1996), o transporte de sedimentos suspenso pode ser definido matematicamente pelas equações (56) e (57):

$$q_{sv} = \int_e^H \bar{u} \bar{c} dy \quad (56)$$

ou

$$q_{sw} = \gamma_s \int_e^H \bar{u} \bar{c} dy \quad (57)$$

Onde q_{sv} e q_{sw} : taxas de transporte de carga suspensa em termos de volume e peso, respectivamente,

\bar{u} e \bar{c} : velocidade média no tempo e concentração de sedimentos por volume a uma distância y acima do leito, respectivamente,

e = espessura da camada onde ocorre o transporte de sedimentos no leito,

H = profundidade da água, e

γ_s = peso específico do sedimento.

Antes que as equações anteriores possam ser integradas, \bar{u} e \bar{c} devem ser expressos matematicamente como funções de y . Extensos estudos foram feitos tanto analiticamente quanto experimentalmente para a determinação dessas relações funcionais. Yang (1996) apresenta diversas fórmulas para quantificação do transporte de sedimentos em suspensão, como as aproximações de: Lane e Kalinske (1941); Einstein (1950); Brooks (1963) e; Chang, Simons e Richardson (1965).

De acordo com Campos (2001), a abordagem apropriada para simular sedimentos em suspensão é empregar a equação de Advecção-Difusão. A advecção refere-se ao deslocamento das partículas causado pelo escoamento do fluido, ou seja, as partículas são transportadas pelo próprio movimento do fluido. Por outro lado, a difusão diz respeito ao movimento das partículas devido às diferenças de concentração molecular, sendo conhecido como movimento Fickiano por ser regido pela primeira lei de Fick (eq. (58)):

$$J_\eta = -\varepsilon \frac{\partial C}{\partial \eta} \quad (58)$$

Onde:

J_η : fluxo difusivo em uma determinada direção η ,

C : concentração da espécie,

ε : coeficiente de difusão de massa.

Aplicando o princípio físico da conservação da massa ao elemento fluido, têm-se a equação de advecção-difusão tridimensional (eq. (59)):

$$\underbrace{\frac{\partial C}{\partial t}}_1 + \underbrace{\frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z}}_2 = -\varepsilon \underbrace{\left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right]}_3 \quad (59)$$

Onde:

1. Variação da concentração da espécie C , local e no tempo,
2. Contribuição advectiva para mudanças locais, onde u é a velocidade média do fluxo nas direções x, y e z ,
3. Difusão, nas direções x, y e z .

Carga total

A carga total é a soma da carga de fundo e da carga suspensa. A maioria das equações de carga total são, na verdade, equações de carga total de material de fundo. Existem duas aproximações gerais para a determinação da carga total. A primeira computa carga do leito e a suspensa separadamente, e então somam ambas para obtenção da carga total. A segunda determina a função da carga total diretamente (YANG, 1996).

Uma partícula de sedimento pode ser transportada por arraste e, em outro momento ou em outro local, por suspensão. Com a exceção de materiais grossos, transportados principalmente como cargas de fundo, as equações de carga total de fundo podem ser usadas para determinação da capacidade de transporte de sedimentos em rios naturais (YANG, 1996).

Yang (1996) apresenta diversas equações para determinação da carga total, como: Yang (1973); Einstein original (1950) e Einstein modificado (Colby e Hembree, 1955); Bagnold (1966); Engelund e Hansen (1972); dentro outras.

4.6 Modelos hidráulicos reduzidos

Conforme Gonçalves (2017), os modelos hidráulicos reduzidos são utilizados para complementar e/ou confirmar os cálculos realizados em projeto, além de possibilitar o estudo em escala reduzida dos fenômenos físicos. Estes modelos podem ser utilizados para solucionar e/ou antecipar possíveis problemas de engenharia hídrica, por meio da avaliação dos efeitos do escoamento e controle das condições de contorno de estruturas hidráulicas. Isso é possível a partir da correlação de medidas obtidas do modelo físico (reduzido) com as do protótipo (valores reais), através de escalas determinadas com base na semelhança de comportamento entre esses sistemas.

Para conduzir experimentos em modelos reduzidos de reservatórios, é essencial compreender os fenômenos hidráulicos envolvidos. Nos reservatórios o escoamento é caracterizado por ser livre, ou seja, atua sob pressão atmosférica (pressões nulas ou próximas de zero), turbulento, com número de Reynolds (Re) maior que 1000, e influenciado pela presença de sedimentos. Os modelos de reservatórios podem ser de leito fixo (sem erosão) ou de leito móvel (com erosão). Os fenômenos relevantes incluem forças hidrodinâmicas (arrasto de corpos, resistência ao escoamento, esforços em equipamentos), transporte de sedimentos (erosão e assoreamento), dissipação de energia e turbulência (JULIEN, 2002).

Os principais números adimensionais usados para garantir a semelhança hidráulica são: Reynolds (forças inerciais/viscosas) e Froude (forças inerciais/gravitacionais), com quatro critérios de similaridade em modelos de fundo móvel: Froude; Resistência (por exemplo, Manning-Strickler); Diâmetro Adimensional do grão e Parâmetro Shields (JULIEN, 2002).

4.6.1 Análise dimensional e teoria da semelhança

Conforme Streeter e Wylie (1980), por meio da possibilidade de reprodução em um modelo reduzido das mesmas relações geométricas e de força verificadas em um protótipo, têm-se a solução adimensional para ambos os casos. Nem sempre é possível obter igualdade para todas as relações, mas obtendo-se a igualdade entre

as forças preponderantes pode ser suficiente para reproduzir os fenômenos desejados.

O teorema de Buckingham, conforme Streeter e Wylie (1980), permite representar fenômenos físicos por meio de parâmetros adimensionais independentes, agrupando as variáveis envolvidas. O processo envolve a escolha de variáveis independentes (m grandezas básicas), que, juntamente com uma variável fixada em função delas, formam grupos adimensionais representando grandezas secundárias.

Na prática, determinam-se as variáveis envolvidas no fenômeno físico estudado, das quais são selecionadas variáveis independentes, representadas pelas m grandezas básicas. Assim, os grupos são formados por uma variável fixada em função das variáveis independentes selecionadas anteriormente, compondo assim grandezas secundárias.

Com base no Teorema de Bridgman (1922), esses grupos podem ser expressos como produtos de potências das grandezas primárias, possibilitando a resolução de sistemas de equações e reduzindo a necessidade de experimentos para analisar uma variável em função das independentes.

4.6.1.1 Semelhança hidráulica

Com base na teoria da semelhança é possível obter escalas do modelo (r) que correlacionam as condições no protótipo (p) com as do modelo físico reduzido (M). A obtenção de semelhança entre modelos físicos e protótipos pode ser alcançada através de três aspectos fundamentais: semelhança geométrica; semelhança cinemática e semelhança dinâmica (JULIEN, 2002).

- **Semelhança geométrica:**

A semelhança geométrica aborda o tamanho relativo em relação a medidas de comprimento de dois sistemas de coordenadas cartesianas (x, y, z), tal como nas equações (60), (61) e (62), área (A) e volume (∇), equações (63) e (64):

$$x_r = \frac{x_p}{x_M} \quad (60)$$

$$y_r = \frac{y_p}{y_M} \quad (61)$$

$$z_r = \frac{z_p}{z_M} \quad (62)$$

$$A_r = \frac{A_p}{A_M} = \frac{x_p y_p}{x_M y_M} = x_r y_r \quad (63)$$

$$V_r = \frac{V_p}{V_M} = \frac{x_p y_p z_p}{x_M y_M z_M} = x_r y_r z_r \quad (64)$$

Nem sempre é possível obter essas relações de semelhança em um modelo devido às possíveis limitações técnicas, de custo ou espaço disponível, sendo necessária a concepção de modelos distorcidos. Os modelos distorcidos resultam na diferença entre as escalas, $y_r \neq z_r$, sendo o fator de distorção obtido por $\frac{y_r}{z_r}$. Já quando as escalas verticais e longitudinais são diferentes, o modelo é chamado de inclinado, $x_r \neq z_r$, sendo a sua declividade determinada por $S_r = \frac{z_r}{x_r}$ (JULIEN, 2002).

- **Semelhança cinemática:**

A semelhança cinemática, em condutos livres, refere-se a parâmetros que envolvem comprimento e tempo, como: velocidade (V); aceleração (a) e viscosidade cinemática (ν). O critério de semelhança de Froude, onde $a_r = g_r = 1$, é fundamental para experimentos com a mesma aceleração gravitacional em modelo e protótipo. Quando aplicada ao modelo e ao protótipo, esta relação produz uma das relações cinemáticas mais importantes na modelagem física como se verifica na equação (65):

$$\frac{V_r}{z_r^{0,5}} = 1 \quad (65)$$

Em modelos distorcidos e inclinados, a escala de tempo varia com a direção, sendo inadequados para simular fluxos 1D e incapazes de explicar adequadamente fenômenos 2D e 3D, como acelerações convectivas, turbulência e dispersão. Esses modelos não devem ser utilizados para simular vorticidade, difusão e mistura turbulenta (JULIEN, 2002).

- **Semelhança dinâmica:**

A semelhança dinâmica implica em similaridade no comportamento dinâmico de fluidos, abrangendo parâmetros como densidade de massa (ρ), peso específico (γ) e viscosidade dinâmica (μ). A escala de densidade de massa ($\rho_r = \frac{\rho_p}{\rho_M}$) e a escala de massa ($m_r = \frac{m_p}{m_M}$) são cruciais para descrever a semelhança dinâmica, juntamente com as escalas de comprimento e tempo. O conceito central é que as forças individuais atuando em elementos de fluido correspondentes devem ter a mesma razão de força em ambos os sistemas. Essas forças podem decorrer do peso em um campo gravitacional, gradientes de pressão, cisalhamento viscoso ou tensão superficial. A força inercial resultante exige que o polígono de forças seja geometricamente similar (JULIEN, 2002).

Os efeitos gravitacionais e viscosos são descritos, respectivamente, pelos números de Froude, eq. (66), e de Reynolds, eq. (67):

$$Fr_r = \frac{V_r}{(g_r z_r)^{0,5}} \quad (66)$$

$$Re_r = \frac{V_r z_r}{\nu_r} \quad (67)$$

Em modelos hidráulicos, a semelhança dos números de Froude e Reynolds ($Fr_r = Re_r = 1$) só é possível quando: $\frac{V_r^2}{z_r} = V_r z_r$, indicando a escala completa: $V_r = z_r = 1$. Conclui-se que a semelhança exata de todas as razões de força em modelos hidráulicos é estritamente impossível, exceto em escala completa. Forças insignificantes em comparação com outras não impactam o polígono de forças, destacando que a habilidade na modelagem hidráulica está em focar a análise nos componentes de força predominantes no sistema. Assim, é preciso determinar se a gravidade ou a viscosidade é o parâmetro físico predominante e ajustar os parâmetros de escala em conformidade. Essa abordagem é válida, desde que os termos gravitacionais ou viscosos possam ser negligenciados (JULIEN, 2002).

4.6.1.2 Semelhança hidráulica em leito móvel

Modelos com leito móvel são úteis em situações em que o transporte de sedimentos é relevante, como no início do movimento dos sedimentos, ou seja, quando o parâmetro de Shields (τ_*) é maior do que 0,06. A semelhança no transporte de sedimentos é alcançada quando o parâmetro de Shields τ_* e o diâmetro de grão adimensional d_* são comparáveis em ambos os sistemas, isto é, $\tau_{*r} = 1$ e $d_{*r} = 1$. Tais condições também implicam que o Reynolds da partícula (Re_{*r}) seja igual a 1, dado que $\tau_* d_*^3 = Re_*^2$ (JULIEN, 2002).

Existem quatro critérios de semelhança para modelos com leito móvel: (1) semelhança de Froude; (2) resistência, como Manning–Strickler; (3) diâmetro do grão adimensional; e (4) transporte de material do leito ou parâmetro de Shields. Esses critérios devem ser atendidos simultaneamente em trechos de rios com escoamento rapidamente variado e transporte de sedimentos. Os critérios são regidos por sete parâmetros: velocidade (V_r); aceleração da gravidade (g_r); comprimento vertical (z_r); diâmetro da partícula (d_{s_r}); inclinação (S_r); densidade do sedimento ($(G - 1)_r$) e viscosidade cinemática do fluido (ν_r) (JULIEN, 2002).

Modelos hidráulicos com, $g_r = \nu_r = 1$, e quatro equações de semelhança deixam apenas 1 grau de liberdade, por exemplo, a escala de comprimento do modelo z_r , além da escala lateral y_r , que não é especificada pelas equações. As semelhanças em leitos móveis são ditas completas, com um grau de liberdade, quando os quatro critérios de semelhança são satisfeitos simultaneamente. Isso implica que a direção jusante do escoamento é dominante e a aceleração nas direções lateral e vertical são negligenciáveis, sendo adequada para processos de transporte de sedimentos em uma dimensão (JULIEN, 2002).

Para a semelhança no diâmetro adimensional do grão, ($d_{*r} = 1$), tem-se a equação (68), que estabelece a relação entre o diâmetro do sedimento e a sua densidade.

$$d_{s_r}^3 = \frac{1}{(G - 1)_r} \quad (68)$$

A partir dessa relação, observa-se que modelos reduzidos requerem sedimentos menos densos quando partículas grandes são utilizadas (JULIEN, 2002).

As relações de escala de semelhança para modelos hidráulicos de leito rígido e de leito móvel, com semelhança completa, modelos distorcidos ou para modelos inclinados pode ser consultada em Julien (2012).

4.7 Modelagem fluidodinâmica computacional tridimensional (CFD-3D)

4.7.1 Definição e vantagens

Fortuna (2000) destaca a complexidade dos fenômenos da mecânica dos fluidos, indicando que análises puramente teóricas muitas vezes não são suficientes. Portanto, recorre-se a métodos experimentais e à simulação numérica, impulsionada pelo aumento do poder computacional e acessibilidade desde a década de 1990. Modelos CFD, embora tenham custos, são mais econômicos do que experimentos reais.

Segundo Versteeg e Malalasekra (2007), a Fluidodinâmica computacional (Computational fluid dynamics – CFD) é a análise de sistemas envolvendo o escoamento de fluidos, transferência de calor e os fenômenos associados, por meio de simulações computacionais.

Hirsch (2007) define CFD como o conjunto de metodologias que permitem ao computador resolver numericamente as leis que modelam o escoamento dos fluidos, dentro ou ao redor de um sistema material, onde sua geometria também é modelada.

Desde a década de 1990, com o aumento do desempenho computacional e da sua acessibilidade, além do surgimento de interfaces mais amigáveis, aumentou-se o interesse em modelos CFD. Os custos associados não são baixos, porém, são menores em relação aos modelos experimentais (VERSTEEG E MALALASEKRA, 2007).

Conforme Versteeg e Malalasekra (2007), podem-se citar várias vantagens do CFD sobre abordagens experimentais, tais quais:

- redução dos prazos de entrega e custos de novos projetos;
- capacidade de estudar sistemas onde experimentos controlados são difíceis ou impossíveis de executar;

- capacidade de estudar sistemas sob condições perigosas dentro e fora de seus limites normais de desempenho;
- alto detalhamento dos resultados.

Segundo White (2011), apesar de as equações de Navier-Stokes terem poucas soluções analíticas conhecidas, a modelagem por computador com malhas refinadas pode resolvê-las. O campo da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) tem evoluído rapidamente, com várias ferramentas de *software* disponíveis. Resultados realistas para uma variedade de escoamentos viscosos podem ser obtidos por simulações CFD. A modelagem computacional avançou consideravelmente, permitindo a simulação de equações do movimento para escoamento de fluidos em computadores. No entanto, a prática requer cuidado, atenção e experiência, especialmente ao lidar com escoamentos turbulentos, onde a precisão da simulação pode ser desafiadora devido ao uso de modelos de turbulência aproximados. O advento de códigos comerciais de CFD facilitou o trabalho dos engenheiros, mas a necessidade de habilidade na interpretação e validação dos resultados persiste.

4.7.2 Constituição do modelo CFD FLOW-3D HYDRO

Os modelos CFD são compostos essencialmente por três elementos principais: (i) pré-processador; (ii) solucionador (Solver) e (iii) pós-processador. No pré-processamento, são realizadas a definição da geometria na área de interesse, a geração da grade (ou malha), a escolha dos fenômenos físicos/químicos a serem modelados, e a especificação das propriedades do fluido e das condições de contorno adequadas. O solucionador é a ferramenta pela qual o modelo CFD resolve numericamente os problemas, havendo as seguintes técnicas de solução numérica: diferenças finitas, volumes finitos, elementos finitos e métodos espectrais. Por sua vez, o pós-processamento compreende a visualização de dados e a representação gráfica dos resultados, englobando a exibição da geometria do domínio e da malha, gráficos de superfície 2D e 3D, manipulação de visualização, animação, entre outros (VERSTEEG E MALALASEKRA, 2007).

Neste segmento, serão expostos os componentes de um modelo CFD, com foco específico no FLOW-3D HYDRO em relação ao seu pré-processamento. Vale ressaltar que o solucionador se fundamenta no método dos volumes finitos, conforme

detalhado no item 4.4, enquanto o pós-processamento será apresentado na seção de resultados (item 6).

4.7.2.1 Geometria e malha

Para dar início a simulação CFD é preciso delimitar a geometria da estrutura a ser analisada e representá-la de maneira discretizada por meio de uma malha numérica. As malhas numéricas são os locais nos quais as variáveis são calculadas e que constituem uma representação discretizada do domínio geométrico no qual o problema será solucionado. Os resultados dos cálculos de velocidade, pressão, temperatura etc., são obtidos nos nós dentro de cada elemento de uma malha. A precisão da solução de uma simulação é diretamente relacionada a quantidade desses elementos. No entanto, quanto maior a precisão, maior o número de elementos e, conseqüentemente, maior o custo computacional e tempo de simulação. Dessa forma, busca-se a otimização no momento de definir o refinamento e gerar a malha da simulação.

As malhas podem ser classificadas em: malhas ortogonais (ou cartesianas) e malhas não ortogonais. As malhas ortogonais apresentam seus elementos de forma estruturada, em forma de hexaedros. Já as malhas não ortogonais podem ser subdivididas em relação a disposição relativa de seus elementos, sendo estruturadas ou não estruturadas (GONÇALVES, 2007).

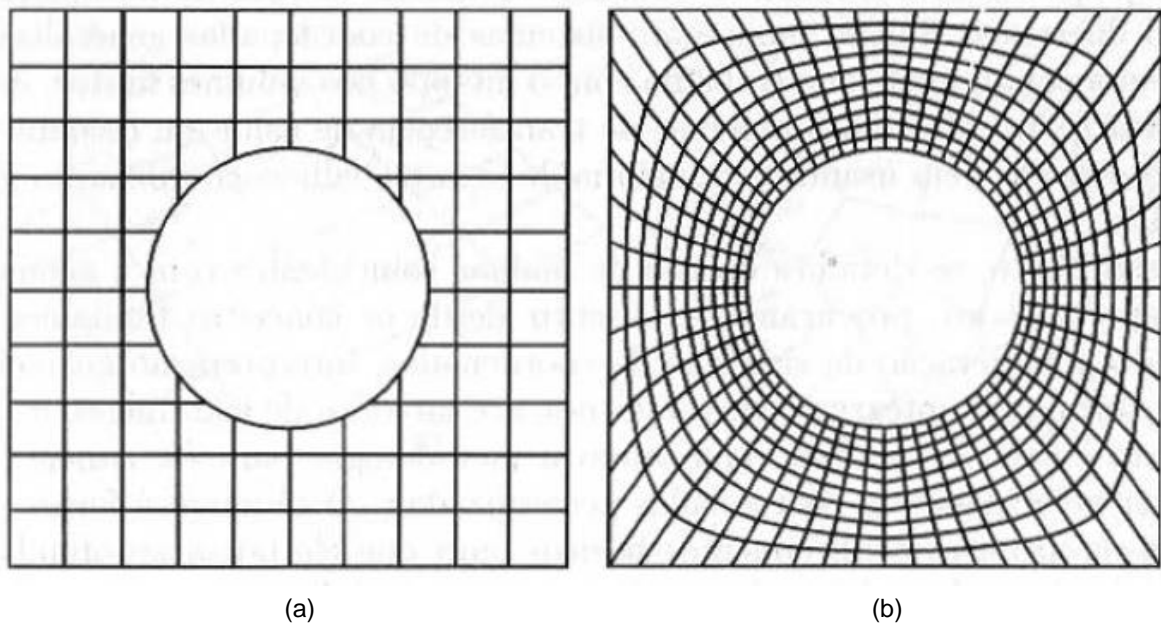
Malhas ortogonais e malhas não ortogonais:

Malhas ortogonais possuem desvantagens significativas ao lidar com a representação de geometrias complexas e irregulares. Isso se deve ao fato de que, ao calcular o fluxo nas fronteiras, é necessário recorrer a aproximações que introduzem erros inerentes. Além disso, há um desperdício de recursos de armazenamento, pois o refinamento em uma região de interesse específica implica no refinamento desnecessário de outras regiões (MALISKA, 1995).

Um exemplo pode ser observado na Figura 11(a), na representação de um cilindro. Malhas não ortogonais por sua vez, são projetadas para se adaptar aos sólidos, Figura 11(b), visando superar as limitações mencionadas anteriormente. Dessa maneira, conseguem incorporar de forma precisa todos os detalhes geométricos, ao

mesmo tempo em que proporcionam o controle preciso da captura de características relevantes em regiões de interesse. Contudo, é importante observar que as equações que modelam o escoamento dos fluidos se tornam consideravelmente mais complexas nesse contexto (MALISKA, 1995).

Figura 11 – Exemplo de malha ortogonal (a) e malha não ortogonal (b)

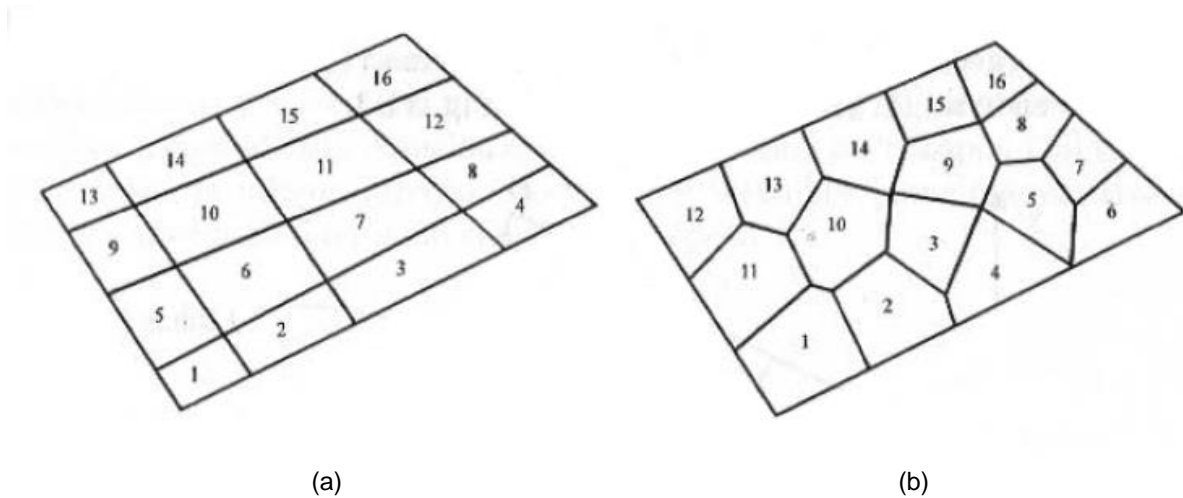


Fonte: Maliska (1995).

Malhas estruturadas e malhas não estruturadas:

A discretização coincidente com a fronteira por meio de um sistema de coordenadas é denominada estruturada, Figura 12(a), pois cada volume interno sempre possui o mesmo número de vizinhos e os elementos são numerados em sequência. Essa regra de ordenação dos elementos simplifica as rotinas computacionais, e a matriz resultante tem diagonais fixas, facilitando a implementação de métodos matriciais. Em contraste, as malhas não estruturadas, Figura 12(b), são mais versáteis e adaptativas, porém, apresentam dificuldades de ordenação, além de impossibilitar a aplicação de métodos de solução de sistemas lineares (MALISKA, 1995).

Figura 12 – Exemplo de malha estruturada (a) e malha não estruturada (b)



Fonte: Maliska (1995).

Malha e geometria no FLOW 3D HYDRO:

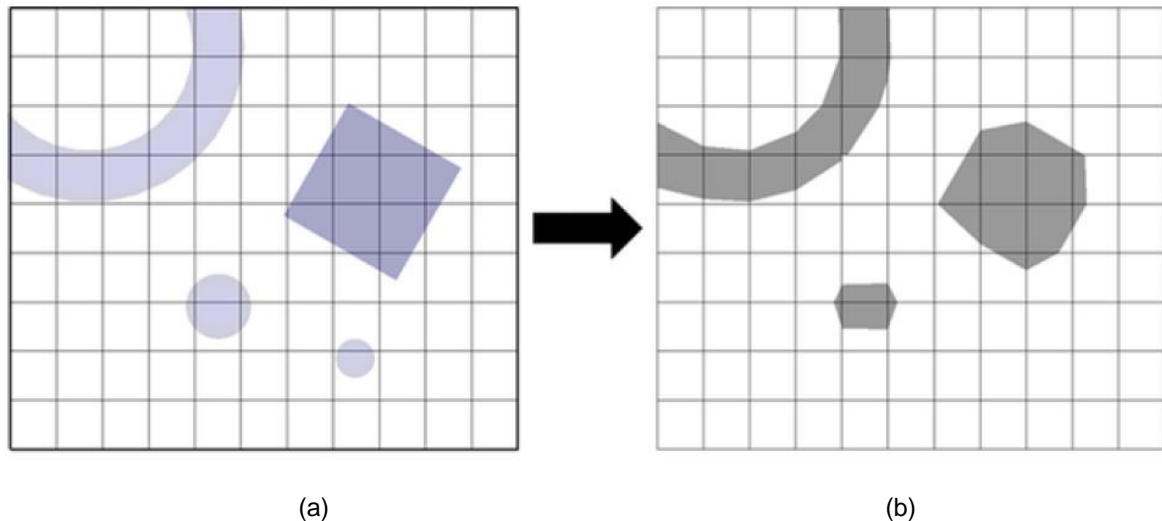
O FLOW-3D HYDRO utiliza malha numérica ortogonal estruturada, podendo ser definida em coordenadas cartesianas ou cilíndricas. As interações entre geometria e malha seguem o método *FAVORTM* - Representação Fracionária de Obstáculos de Área-Volume. Este método é usado exclusivamente no FLOW-3D HYDRO e foi desenvolvido por Hirt e Sicilian em 1985. A técnica permite definições independentes da malha e geometria, facilitando modificações na geometria sem redefinir a malha e permite a definição de múltiplos blocos de malha para criar malhas eficientes em modelos de geometria complexa, sendo estes blocos alinhados, vinculados ou sobrepostos parcialmente (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

As equações diferenciais a serem resolvidas são expressas em coordenadas cartesianas (x, y, z), sendo adaptadas para coordenadas cilíndricas (r, θ, z) mediante um coeficiente, ξ . Esse coeficiente define a transição entre geometria cartesiana ($\xi = 0$) e cilíndrica ($\xi = 1$). As equações são formuladas com funções de porosidade de área e volume (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

O *FAVORTM* calcula frações de área para cada face da célula na malha, determinando a presença de cantos dentro ou fora da geometria definida. Os algoritmos do *FAVORTM* são executados durante o pré-processamento e a cada passo de tempo, ajustando-se à mudança na geometria durante a simulação. O método assume conexões em linha reta entre pontos de interseção na face, introduzindo pequenos erros em

geometrias curvas. Pequenos objetos esféricos podem não ser registrados, a menos que cubram pelo menos um vértice da grade. A representação melhora com o aumento da resolução da malha (FLOW-3D-HYDRO, 2023). Observa-se um exemplo de como um objeto real, Figura 13(a), poderia ser representado por meio do método supracitado, Figura 13(b).

Figura 13 – Geometria real (a) e geometria representada (b) empregando o método *FAVOR*TM



Fonte: FLOW 3D (2023).

4.7.2.2 Interface de fluidos e superfícies livres

No FLOW-3D, em simulações com superfície livre, a inércia do gás adjacente ao líquido é negligenciada, substituindo-se o volume ocupado pelo gás por um espaço vazio sem massa, representado apenas por pressão e temperatura uniformes. Essa abordagem reduz o esforço computacional, uma vez que, geralmente, os detalhes do movimento do gás não são relevantes para o movimento do líquido mais denso. A superfície livre é tratada como um dos limites externos do líquido (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

O método *Volume of Fluid (VOF)*, desenvolvido por Hirt e Nichols (1981), é utilizado no FLOW-3D para essa finalidade e compreende três componentes principais: a definição do volume da função de fluido; um método para resolver a equação de transporte VOF e; a definição das condições de contorno na superfície livre (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

Existem diferentes abordagens para rastrear interfaces de fluido no FLOW-3D, cada uma sendo mais adequada para tipos específicos de problemas de escoamento do

fluido. As interfaces de fluido podem ser do tipo nítida ou difusa, sendo a escolha padrão determinada pelo número de fluidos e pela presença de uma interface nítida, tal como uma superfície livre em escoamentos de um fluido com regiões vazias ou em problemas de dois fluidos, como a interface entre água e ar (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

As simulações envolvendo dois fluidos com uma interface clara utilizam uma técnica de advecção de células doadoras, onde a célula doadora pode estar localizada em qualquer lado da interface. Já para um fluido e superfície livre, a célula doadora está sempre no lado $F = 1$ da interface. Os métodos Lagrangianos, como *Unsplit* e *Split* (também conhecido como *TruVOF*), são apropriados tanto para escoamento de apenas um fluido, quanto para dois. Em geral, ambos os métodos demonstram precisão na rastreabilidade de interfaces nítidas em movimentos tridimensionais (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

4.7.2.3 Módulos físicos

O modelo FLOW-3D HYDRO® dispõe de diversos módulos físicos e numéricos para a representação dos fenômenos físicos esperados. No presente estudo utilizaram-se os módulos *Gravity and Non-Inertial Reference*, *Sediment Transport*, *Variable Density Flow* e *Viscosity and Turbulence* para a representação dos fenômenos físicos esperados.

- **Gravity and Non-Inertial Reference:**

O modelo físico *Gravity and Non-Inertial Reference* representa forças constantes, como a gravidade, e forças não constantes e não uniformes resultantes de um referencial que sofre aceleração em relação a um referencial inercial (que não sofre nenhuma aceleração) (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

- **Sediment Transport:**

O *Sediment Transport* estima o movimento do sedimento prevendo a erosão, advecção e deposição de sedimento, por meio do cálculo do transporte de sedimentos em suspensão, cálculo da sedimentação de sedimentos devido à gravidade, o arrastamento do sedimento devido ao cisalhamento do leito e perturbações do fluxo

e, do transporte de carga no leito, em que os grãos de sedimentos rolam, pulam ou deslizam ao longo do leito de sedimentos compactados. A partir deste módulo é possível considerar diversos tipos de sedimentos não coesos com diferentes propriedades, incluindo tamanho de grão, densidade de massa, tensão de cisalhamento crítica, ângulo de repouso e parâmetros de arrastamento e transporte (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

O FLOW-3D calcula sedimentos considerando dois estados nos quais o sedimento pode existir: suspenso e compactado. O sedimento suspenso é caracterizado por uma baixa concentração e move-se com o escoamento do fluido. Já o sedimento compactado existe na fração crítica de empacotamento (volume de todas as espécies de sedimentos/volume aberto na célula), ou seja, a fração de sedimento fica compactada, tem seus espaços vazios deixados por partículas maiores preenchidos por partículas menores, e não flui. Apenas uma fina camada superficial de grãos desse sedimento pode se mover na forma de transporte de carga de fundo (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

O sedimento é arrastado devido à ressuspensão causada pelo cisalhamento e por pequenos redemoinhos que se formam na interface do sedimento compactado. Devido à impossibilidade de calcular a dinâmica do fluxo em torno de cada grão individual de sedimento, o FLOW-3D utiliza um modelo empírico para representar esse processo, ou seja, modelos que tentam representar as condições e os fatores que levam à geração de correntes de turbidez, que são escoamentos densos de água carregados com sedimentos. O modelo específico usado no FLOW-3D é baseado em Mastbergen e Van den Berg (2003) (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

O *software* também permite ao usuário definir parâmetros, como a fração crítica de empacotamento, ou compactação, e o parâmetro crítico de Shields, que influenciam no comportamento do sedimento suspenso. Por padrão, o valor do parâmetro crítico de Shields é definido como 0,05 no FLOW-3D (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

O parâmetro crítico de Shields pode ser definido pelo usuário ou pode ser calculado utilizando a equação de Soulsby-Whitehouse. Além disso, esse parâmetro pode ser ajustado para superfícies inclinadas com base no ângulo de repouso (ângulo crítico em que o movimento começa). O cálculo da descarga sólida do material do leito pode

ser feita com base nas equações empíricas de Meyer-Peter & Muller, Nielsen ou Van Rijn (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

Para cada espécie de sedimento, a concentração de sedimentos em suspensão é calculada resolvendo a equação de Advecção-Difusão, conforme item 4.5.6, e para evitar a instabilidade numérica convectiva, é considerada uma restrição em que os grãos de sedimentos não podem ser transportados através de mais de uma célula computacional em um intervalo de tempo. O efeito da área fracionária e do volume aberto à advecção de sedimentos também são considerados (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

- **Variable Density Flow:**

O modelo *Variable Density Flow* interfere na precisão das simulações de transporte de sedimentos, permitindo que a densidade do fluido seja calculada em função do sedimento suspenso arrastado. Este modelo é ativado automaticamente para permitir o cálculo da densidade do fluido em função do sedimento suspenso arrastado, no entanto, é possível ignorar os efeitos dos sedimentos na densidade do fluido (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

- **Viscosity and Turbulence:**

O manual FLOW-3D-HYDRO (2023) destaca a importância da escolha de um modelo de turbulência adequado para escoamentos turbulentos, especialmente no transporte de sedimentos, onde a precisão nas estimativas das tensões de cisalhamento próximas à parede é crucial. A modelagem desses efeitos de parede envolve considerações sobre as condições de deslizamento na superfície, rugosidade da superfície e tamanho da malha para capturar adequadamente o perfil de velocidade próximo à parede.

No contexto do modelo de escoamento viscoso, optou-se por condições sem deslizamento, escolhendo "Calculate wall shear stress", uma vez que o deslizamento na parede não é aplicável a escoamentos turbulentos. O modelo de turbulência "Renormalized Group (RNG)" busca melhorar a precisão na previsão de fenômenos

turbulentos, utilizando a renormalização como método para corrigir as equações de transporte de Reynolds médio.

O RNG foi desenvolvido para superar limitações de modelos anteriores, como o modelo k - ε padrão, e utiliza a teoria de grupos renormalizados para derivar equações de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação turbulenta (ε). O artigo de revisão de Zhou et al., (1997), aborda diversos aspectos das aplicações da RG (renormalização) à turbulência, fornecendo uma visão aprofundada sobre o tema.

- **Rugosidade:**

Considerando a modelagem de um escoamento hidraulicamente rugoso, ou seja, quando o fluido escoar sobre uma superfície com irregularidades, turbulências e perturbações são geradas. Nesse cenário, a camada limite viscosa sobre a superfície rugosa torna-se mais espessa do que em uma superfície lisa, devido à interação intensa entre o fluido e as irregularidades. Isso resulta em uma maior resistência ao escoamento, afetando a distribuição de velocidade, pressão e o perfil de fluxo ao longo da seção transversal do canal ou tubulação.

Para representar essa irregularidade na superfície, comumente adota-se uma altura de rugosidade efetiva, geralmente representada por K_s . No FLOW-3D HYDRO, o parâmetro de rugosidade K_s é definido como uma altura efetiva, medida de comprimento, das irregularidades da superfície. De acordo com Steffler e Blackburn (2002), a altura de rugosidade efetiva pode ser relacionada ao parâmetro de rugosidade (n de Manning) para uma determinada profundidade de fluxo, H , conforme as equações (69) e (70).

$$K_s = \frac{12H}{e^m} \quad (69)$$

$$m = \frac{H^{\frac{1}{6}}}{2,5n\sqrt{g}} \quad (70)$$

Sendo K_s = altura da rugosidade (m), H = profundidade do fluxo (m), n = coeficiente de Manning e g = aceleração da gravidade (m/s^2).

5 METODOLOGIA / MATERIAL E MÉTODOS

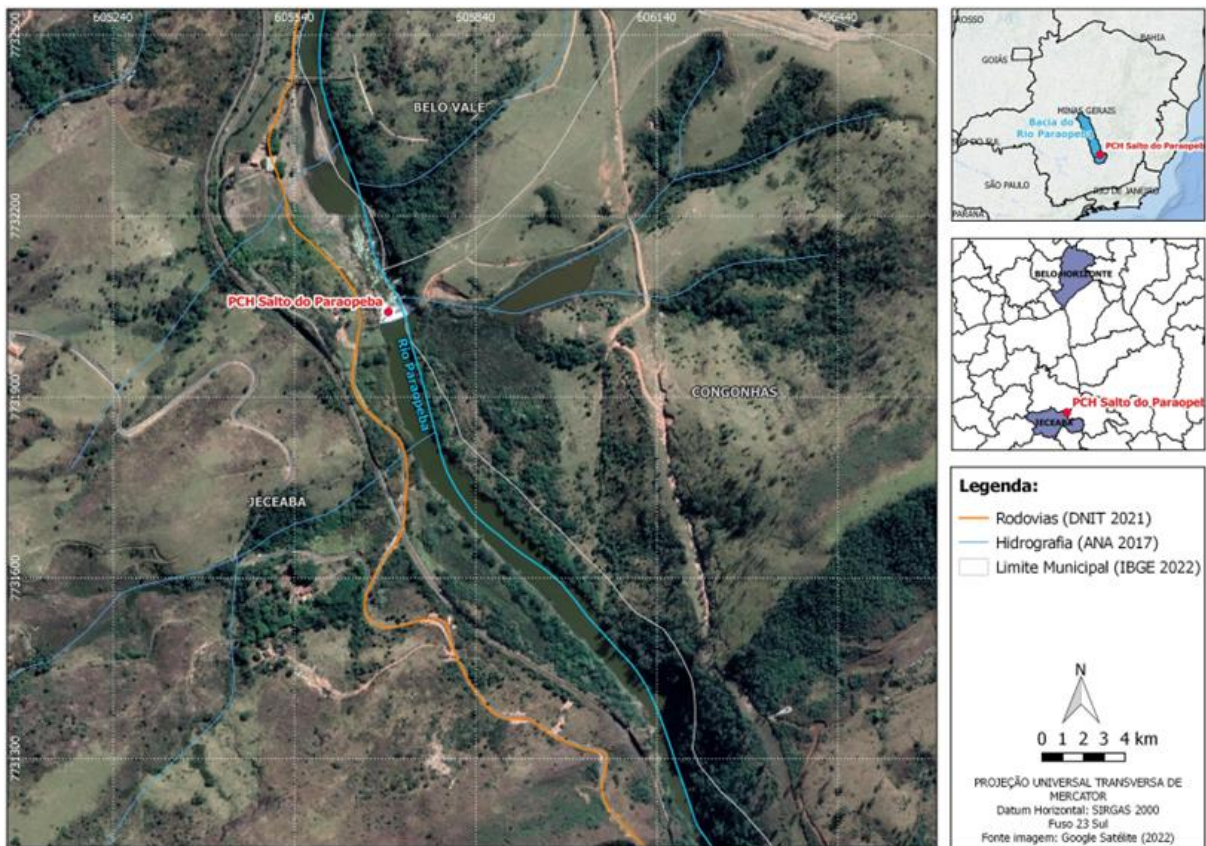
5.1 Descrição da área de estudo

A fim de se avaliar a eficiência de um modelo numérico tridimensional em reproduzir o transporte de sedimentos em reservatórios a fio d'água, foi selecionada a Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Salto do Paraopeba, cujo modelo físico em escala reduzida está disposto no Centro de Pesquisas e Recursos Hídricos (CPH) na Universidade Federal de Minas Gerais.

A PCH Salto do Paraopeba está localizada no rio Paraopeba, próximo à cidade de Jeceaba, Minas Gerais, a cerca de 3 quilômetros da sede do município. Seu reservatório abrange a divisa dos municípios de Belo Vale, Congonhas e Jeceaba, conforme Figura 14. A PCH foi construída entre 1950 e 1956 pela Companhia Força e Luz de Conselheiro Lafaiete, possuindo duas unidades de geração com potência nominal de 2,46 MW.

Reformas foram realizadas na usina pela CEMIG em 2001, mas, apesar dos reparos nas descargas de fundo e serviços de dragagem nas grades e área da tomada d'água, a usina sofreu diversas paralisações causadas pela chegada constante de sedimentos ao reservatório e, conseqüente, acúmulo de entulhos na entrada do circuito de geração e nas proximidades do vertedor. A usina não opera desde 2006, sendo que em 2016 iniciou-se um processo de reabilitação com demolição controlada da passarela e dos pilares sobre a crista do vertedouro. Atualmente as obras se encontram paralisadas (CEMIG, 2023).

Figura 14 – Mapa de localização da PCH Salto do Paraopeba



Fonte: Mapa elaborado pelo autor no *software* QGIS a partir de imagem do Google Satélite (2023).

5.2 Modelo hidráulico reduzido da PCH Salto do Paraopeba

O modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba foi construído com base nos dados topográficos e batimétricos fornecidos pela CEMIG. Foi utilizada fibra de vidro, poliestireno e argamassa na sua construção. A escala definida foi de 1:40 e o sistema de bombeamento é capaz de recalcar 300 m³/h (CAMPOS, 2018). A partir da Figura 15 é possível verificar a vista por jusante da PCH Salto Paraopeba em 2014 e do respectivo modelo reduzido construído no CPH.

Figura 15 – PCH Salto do Paraopeba em 2014 e modelo reduzido



Fonte: Campos (2018).

A avaliação da velocidade no modelo reduzido foi conduzida no contexto do estudo realizado por Campos (2018). Para isso, utilizou-se um velocímetro acústico Doppler (ADV), que emprega o método de reflexão de ultrassom para efetuar medições tridimensionais de velocidade. Estabeleceu-se uma grade com intervalos horizontais de 10 centímetros e variação vertical a cada 5 centímetros. A velocidade em cada ponto foi determinada pela média de 500 medições de velocidade por ponto.

Devido às limitações do ADV, a medição de velocidade na superfície foi feita a partir da cronometragem do lançamento de objeto flutuante em um intervalo de distância conhecida. Foram realizadas quatro medições, descartando-se o valor mais discrepante e calculando-se a velocidade pela média das três velocidades selecionadas (CAMPOS, 2018).

No trabalho de Campos (2018), para avaliar os efeitos da variação do coeficiente de rugosidade do leito por meio de simulações numéricas bidimensionais, foram determinados os campos de velocidade em seções transversais predefinidas no modelo reduzido em 3 dimensões, sob as condições de três cenários:

- Cenário 1: cheias ordinárias (TR = 1,01 anos; Q = 50,5 m³/h) e reservatório limpo;
- Cenário 2: vazões de cheias (TR ~5 anos; Q = 275 m³/h) e reservatório limpo;
- Cenário 3: cheias ordinárias (TR = 1,01 anos; Q = 50,5 m³/h) e reservatório 37,3% assoreado.

Foram utilizadas duas vazões de referência, uma com regime subcrítico, ($Fr < 1$) e outra supercrítico ($Fr > 1$), para as simulações do canal limpo e do canal assoreado. Para simulação dos sedimentos foi utilizada borracha de pneu moída com diâmetros de 2 mm a 3 mm, que apresenta comportamento semelhante ao da areia para a sedimentação em modelo físico. Essa caracterização da borracha como representação do sedimento presente na usina foi realizada no trabalho de Campello (2017).

Para avaliar a condição de assoreamento do reservatório, foram colocados 300 litros de borracha de pneus moída perto da entrada do modelo e as bombas foram acionadas com vazões de 50,5 m³/h durante 1 hora. Esse processo foi adotado visando alcançar uma praia estável, na qual o transporte de sedimentos estivesse em equilíbrio entre a entrada e a saída durante a simulação (CAMPOS, 2018).

5.3 Representação do sedimento

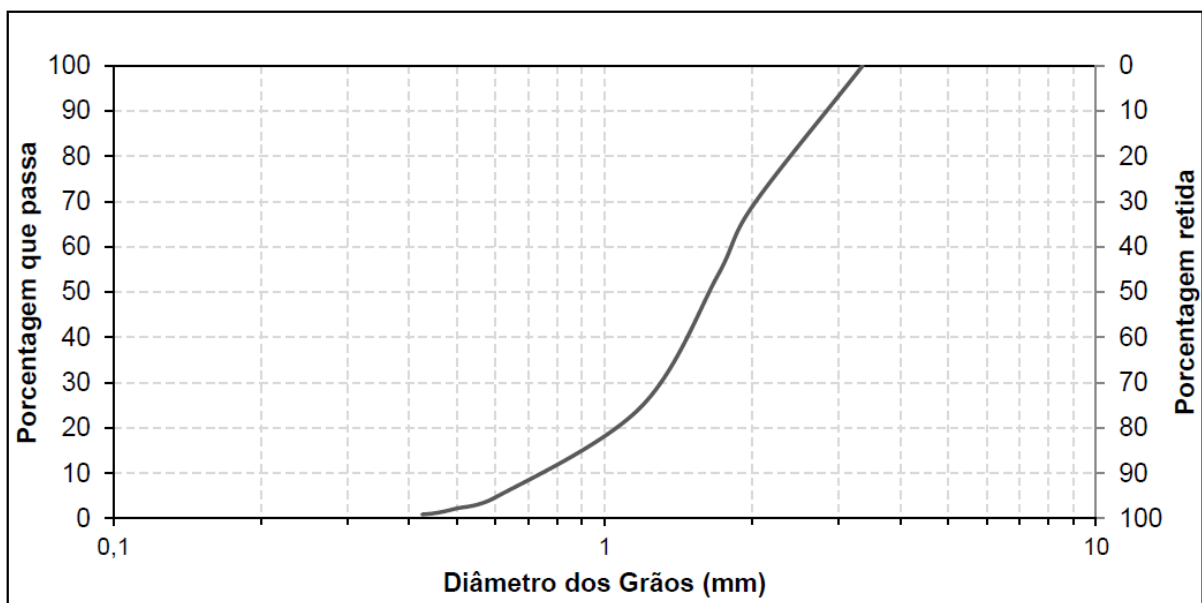
Para investigar o processo de transporte e deposição de sedimentos no reservatório, foi necessário caracterizar o material presente. Para tanto, foram realizadas coletas de material de fundo em toda a extensão e margens da PCH Salto Paraopeba no âmbito do trabalho de Campello (2017). Esse material passou por um processo de peneiramento para definir sua distribuição granulométrica, a qual, em sua maioria, abrange a faixa de areia muito fina, fina e média.

Para representar essas condições no modelo reduzido, aplicando-se o fator da escala, a faixa granulométrica original do protótipo foi reduzida para aquela correspondente ao silte e à areia muito fina. Essa limitação inviabilizaria o estudo do fenômeno de transporte de sedimentos em um modelo físico.

Diante desse cenário, tornou-se necessário selecionar um material com diâmetro maior e menor densidade em relação à areia. Após uma extensa pesquisa no mercado em busca de materiais que atendessem aos critérios necessários, o CPH concluiu que o grão de borracha moído proveniente de pneus seria a escolha mais adequada. Esse material foi selecionado por representar o comportamento dos grãos de areia, além de apresentar baixo custo e ser um material sintético de fácil obtenção.

O trabalho de Campello (2017), teve como foco o estudo da velocidade de queda e do início do movimento das partículas de borracha e areia. A curva granulométrica da borracha pode ser verificada na Figura 16.

Figura 16 – Curva granulométrica da borracha.

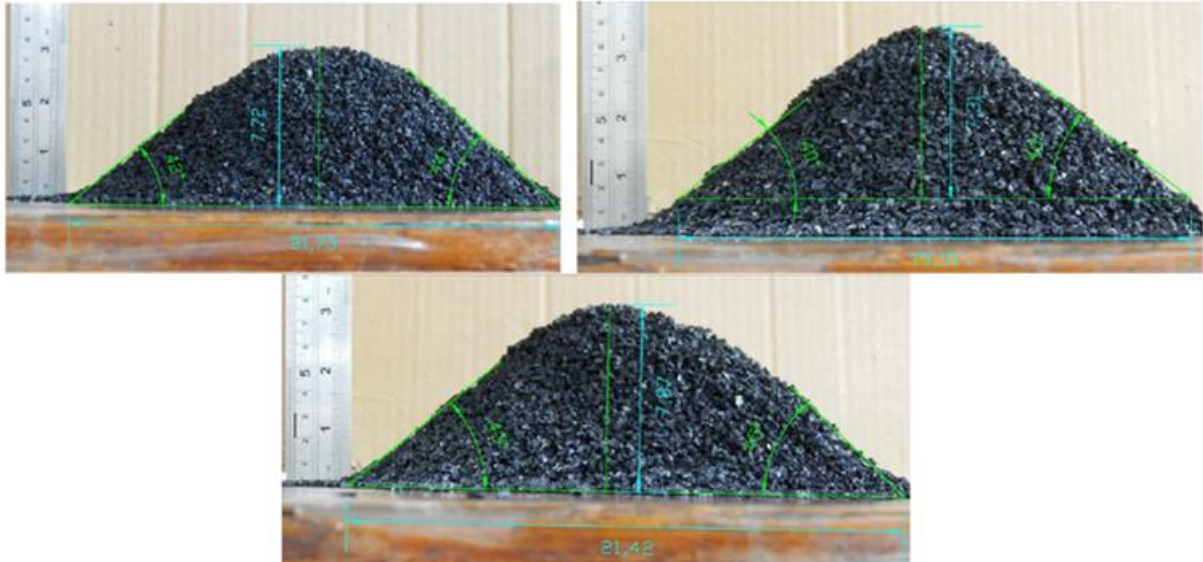


Fonte: Campello (2017).

Para determinar o ângulo de repouso da areia e da borracha, Campello (2017) utilizou um funil preenchido completamente com a amostra do material e após a formação do cone de deposição, foi utilizada a câmera fotográfica para registro e medição dos resultados, Figura 17. Com os arquivos digitais do cone de deposição, os parâmetros de altura e diâmetro médio do cone foram estimados e o ângulo formado entre o cone

e o plano horizontal foi determinado por equação, sendo de aproximadamente 36° para a faixa granulométrica de 3,00 a 2,00 mm e de aproximadamente 42° por meio do *software* AutoCAD.

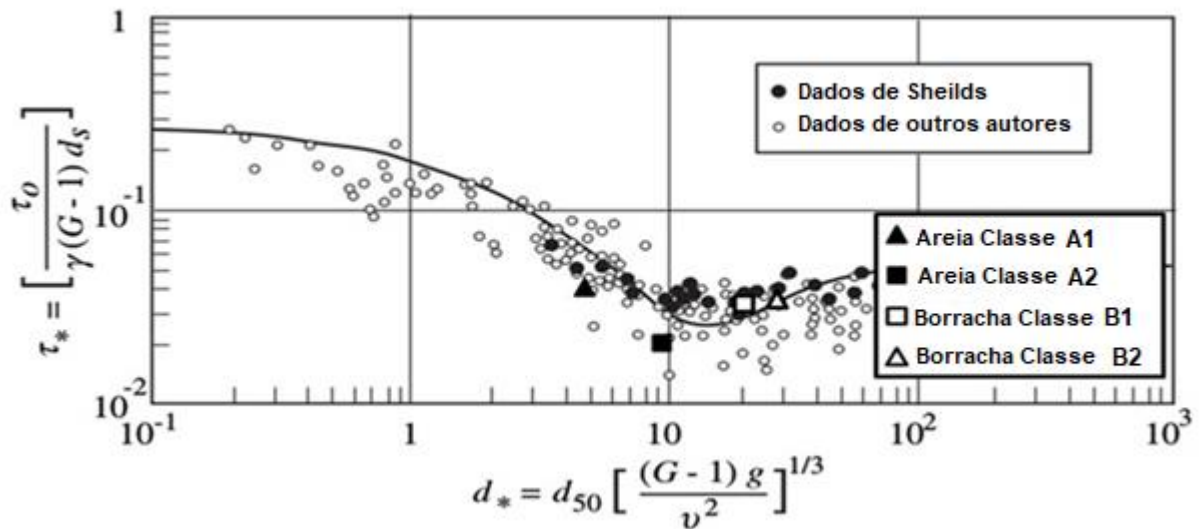
Figura 17 – Ângulo de repouso da borracha: classe granulométrica 3,00 mm a 2,00 mm.



Fonte: Campello (2017).

Os ensaios para avaliação do início do movimento das partículas foram realizados para a declividade do canal de acrílico de 0,001 m/m, calculado para a condição atual do fundo do reservatório da PCH Salto do Paraopeba. Para esta declividade e para os parâmetros físicos dos grãos determinados (diâmetro, densidade e ângulo de repouso) foram calculadas as tensões críticas de Shields. No âmbito do trabalho de Campello (2017), o parâmetro de Shields foi determinado com base na adoção de uma massa específica média para a borracha. Verificou-se que o parâmetro de Shields experimental é sensível à massa específica, alterando significativamente a posição de plotagem do dado experimental em relação à curva de Shields. Posteriormente a massa específica foi determinada no CPH sendo de 1.140 kg/m^3 e assim, o diagrama de Shields pôde ser obtido de maneira mais precisa, sendo a tensão crítica de aproximadamente 0,035, conforme se verifica na Figura 18.

Figura 18 – Tensões críticas de Shields experimental da borracha em relação a curva de Shields modificada para massa específica igual a 1.140 kg/m³



Fonte: 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.

5.4 Modelo numérico computacional

Para avaliação do transporte de sedimentos do modelo físico reduzido da PCH Salto Paraopeba, foi utilizado o modelo computacional tridimensional FLOW-3D HYDRO®, desenvolvido pela *FlowScience*, que utiliza o Método dos Volumes Finitos na discretização algébrica das equações de Navier-Stokes, juntamente com as considerações de médias de Reynolds, conservação de massa, modelo de turbulência e a equação de advecção-difusão.

5.4.1 Premissas e critérios

As premissas e critérios que subsidiaram o estudo foram:

- A simulação ocorreu em ambiente 3D em 1 bloco da malha de cálculo;

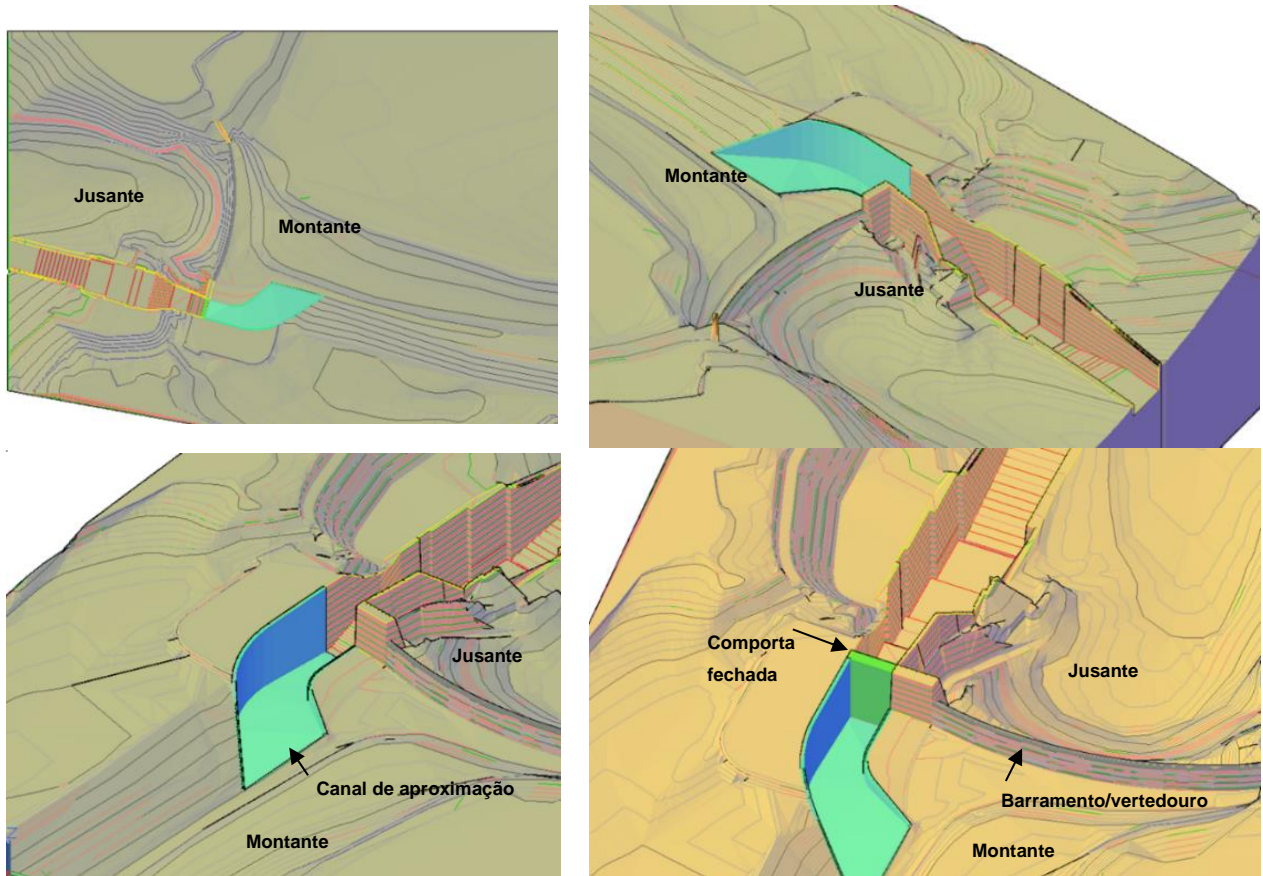
- Foi realizado o refinamento da malha a fim de se obter a otimização entre precisão dos resultados, custo computacional e tempo de simulação;
- Período de simulação suficiente para estabilização do modelo, avaliando-se diversas variáveis de saída do modelo, como: percentual de variação de volume do fluido, variação da energia cinética média, convergência da pressão, estabilização dos resultados nas seções fluviais, entre outros;
- Compatibilização das alturas de rugosidade para representação adequada dos sedimentos;
- Representação dos cenários nas condições de reservatório limpo no intuito de calibrar o modelo hidráulico, levando-se em consideração a curva de descarga medida no modelo experimental;
- Representação da condição de reservatório assoreado, considerando as características físicas da borracha, determinadas experimentalmente no CPH no âmbito do trabalho de Campello (2017);
- Para todos os cenários de simulação a comporta se manteve fechada no canal de aproximação.

5.4.2 Geometria

A geometria é construída no FLOW-3D HYDRO pela montagem de objetos geométricos sólidos para definir a região do fluxo para uma simulação. A geometria é incorporada na malha pelo pré-processador usando o método *Fractional Area/Volume Obstacle Representation – FAVORTM*, que calcula as frações de área aberta nas faces da célula junto a fração de volume aberto e reconstrói a geometria com base nesses parâmetros (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

Em posse da topografia na escala de 1:40, utilizou-se o *software* AutoCad Civil 3D para gerar e exportar a geometria na extensão *.stl*, compatível com a entrada de dados no FLOW-3D HYDRO, conforme Figura 19. Cabe ressaltar que no presente estudo não foi necessária a implementação da casa de força, já que a área de interesse se limita ao reservatório a montante do barramento.

Figura 19 – Modelo digital de terreno utilizado na modelagem CFD



Fonte: Autor (2024).

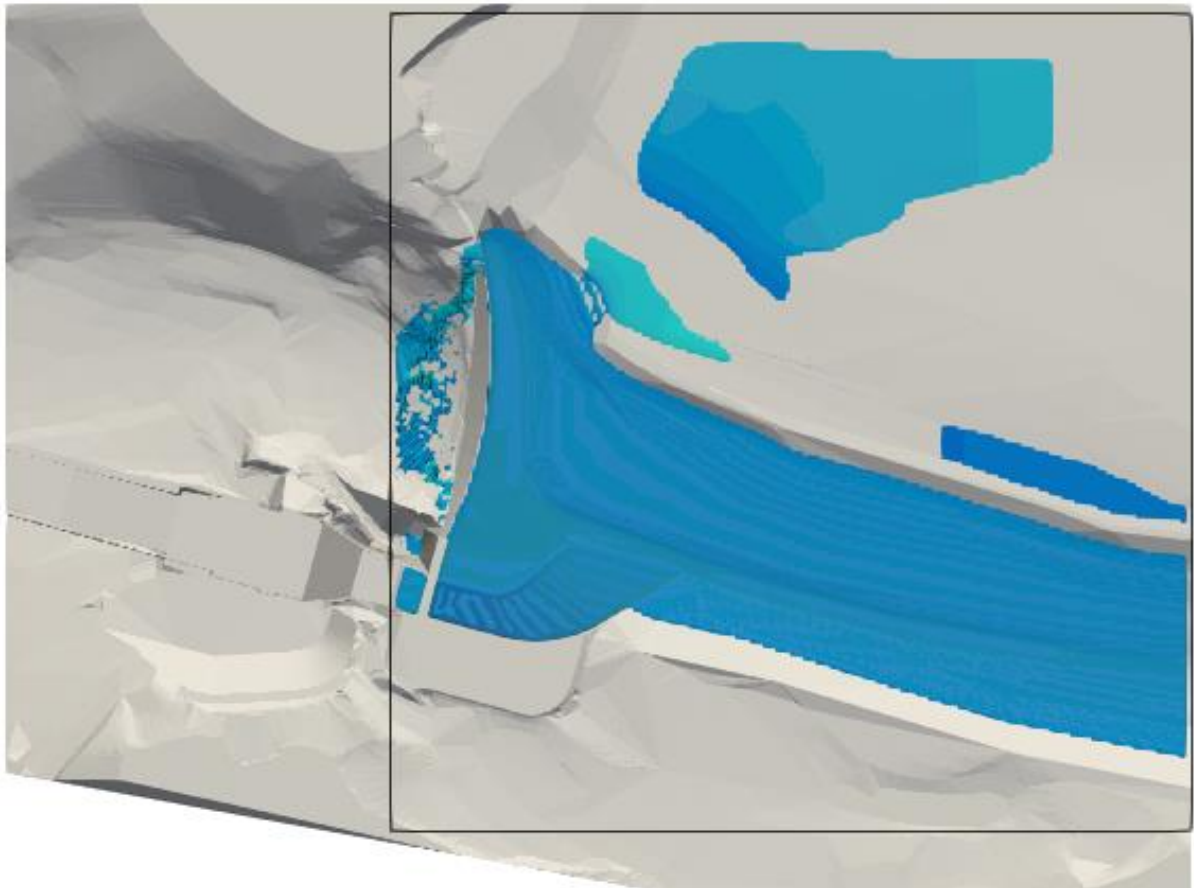
5.4.3 Malha

O FLOW-3D HYDRO utiliza malhas ortogonais estruturadas seguindo o método *FAVORTM* para interação com as geometrias, que permite definições completamente independentes da malha e geometria, ou seja, a geometria pode ser modificada sem redefinir a malha. Uma malha ortogonal é formada por células que seguem um espaçamento nas três dimensões (x, y e z). Para a criação de um modelo de domínio complexo, é possível combinar diversos blocos de malha adjacentes (FLOW-3D-HYDRO, 2023).

A definição da malha computacional no presente estudo concentrou-se em representar exclusivamente a área de interesse, especificamente o reservatório a montante da barragem, para analisar os campos de velocidade e transporte de sedimentos nessa região. Embora tenha sido considerada a subdivisão da malha em blocos, a decisão foi utilizar apenas um bloco tridimensional de malha para representar o reservatório. Isso se deve ao aumento do número de núcleos

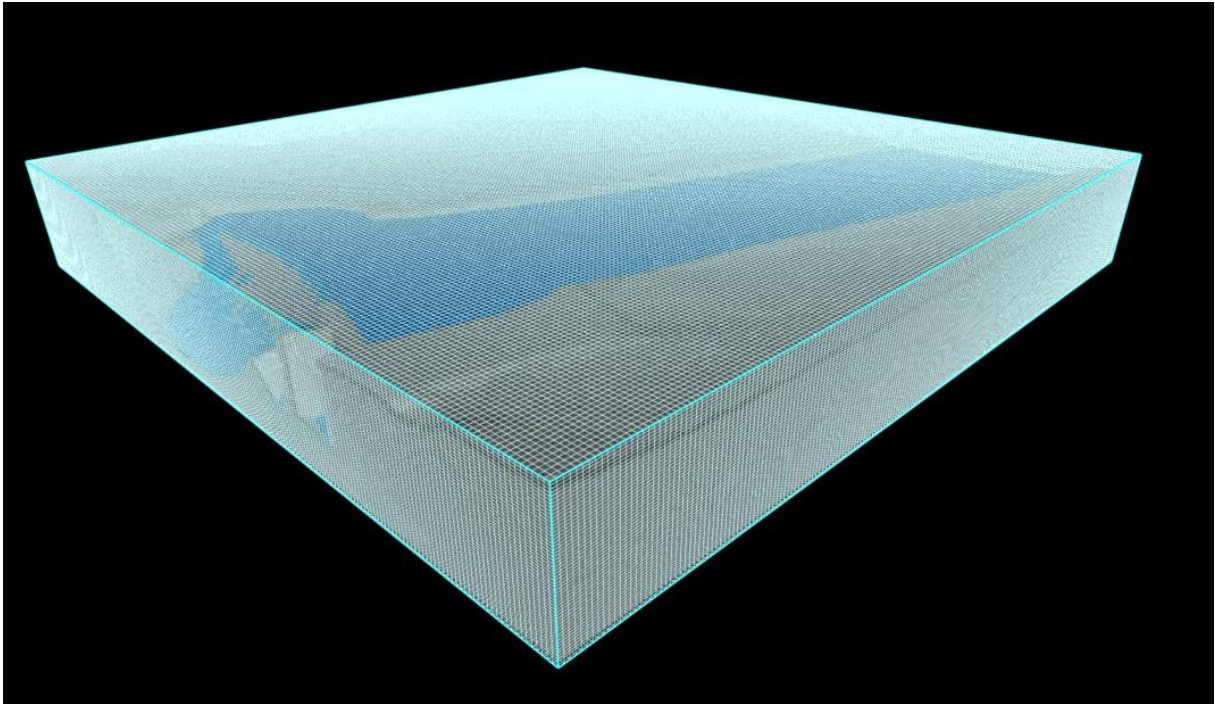
necessários para processar a simulação conforme se aumenta o número de blocos de malha. Essa decisão foi guiada pela necessidade de otimização e pelas restrições da licença educacional, utilizada no trabalho. Apesar dessas limitações, a abordagem adotada é suficiente para quantificar de maneira precisa e eficiente o transporte de sedimentos. A delimitação da malha computacional pode ser verificada na Figura 20 e seu detalhamento em perspectiva tridimensional na Figura 21.

Figura 20 – Delimitação da malha computacional do estudo do modelo físico reduzido da PCH Salto do Paraopeba



Fonte: Autor (2024).

Figura 21 – Detalhamento da malha computacional em perspectiva 3D do modelo físico reduzido da PCH Salto do Paraopeba



Fonte: Autor (2024).

A partir disso, foram realizados uma série de testes variando o espaçamento dos elementos da malha para a simulação do modelo hidráulico (reservatório limpo, sem o modelo de transporte de sedimentos ativo). Para facilitar esse processo, implementou-se a técnica de *Restart*, permitindo a continuidade das simulações a partir do ponto em que foram interrompidas, o que acelerou a convergência. À medida que o reservatório era preenchido, os resultados obtidos eram aproveitados nos modelos subsequentes, possibilitando simulações mais ágeis e refinando a malha a cada nova simulação.

A modelagem iniciou com uma malha mais grosseira. Posteriormente, após a conversão dos resultados, a malha foi ajustada para uma versão mais refinada, seguindo esse processo de refinamento consecutivo até chegar à 4ª malha. Essa última foi considerada suficientemente refinada para garantir resultados precisos em relação ao tempo de simulação, viabilizando as simulações necessárias para a calibração da rugosidade e a determinação da curva de descarga.

No que diz respeito às simulações envolvendo o reservatório assoreado, considerando o aumento significativo do tempo necessário para a simulação devido à

ativação do módulo de transporte de sedimentos, e a exigência de que a simulação ocorresse ao longo de uma hora, foi necessário reduzir o refinamento e o tamanho da malha após o período de enchimento do reservatório e estabilização do volume de água. Após 324 segundos de simulação, o espaçamento na direção z da malha aumentou, e o limite da malha computacional também foi reduzido. Importante mencionar que foi necessário aumentar o intervalo de tempo para salvar os resultados após a estabilização do modelo de transporte de sedimentos, passando de 1 segundo para a cada 36 segundos.

A Tabela 1 apresenta informações detalhadas sobre os modelos desenvolvidos durante esse processo. A Figura 22 ilustra a delimitação da malha final utilizada para a modelagem do transporte de sedimentos na configuração da praia estável.

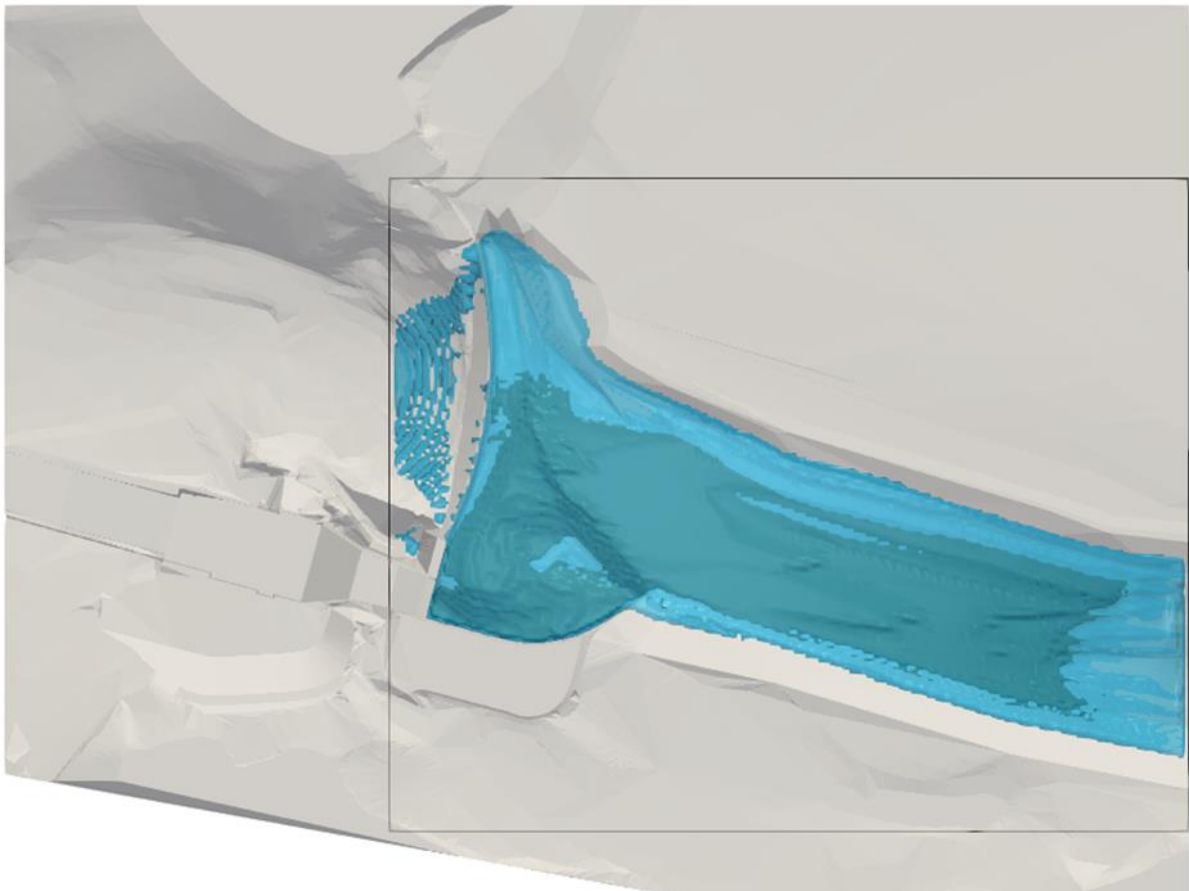
Tabela 1 – Configuração das malhas de cálculo utilizadas na modelagem

Malha	Objetivo	Modelo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Número de elementos	Tempo de simulação (s)
1ª	Refinamento de malha	Hidráulico	0,100	0,100	0,100	33.507	44
2ª			0,050	0,050	0,050	265.428	44
3ª			0,040	0,040	0,040	530.334	44
4ª	Calibração da rugosidade/ Determinação da curva de descarga	Transporte de sedimentos	0,025	0,025	0,0125	2.195.200	30
5ª	Enchimento reservatório e estabilização do modelo		0,025	0,025	0,0125	2.195.200	324
6ª	Conformação da praia estável		0,025	0,025	0,025	627.200	3276

Fonte: Autor (2024).

O *Restart* foi utilizado também durante as simulações do modelo de transporte de sedimentos, pois ocorreram algumas interrupções, devido a instabilidades da licença e/ou outras eventualidades.

Figura 22 – Delimitação da malha computacional do estudo do modelo de transporte de sedimentos após 324s

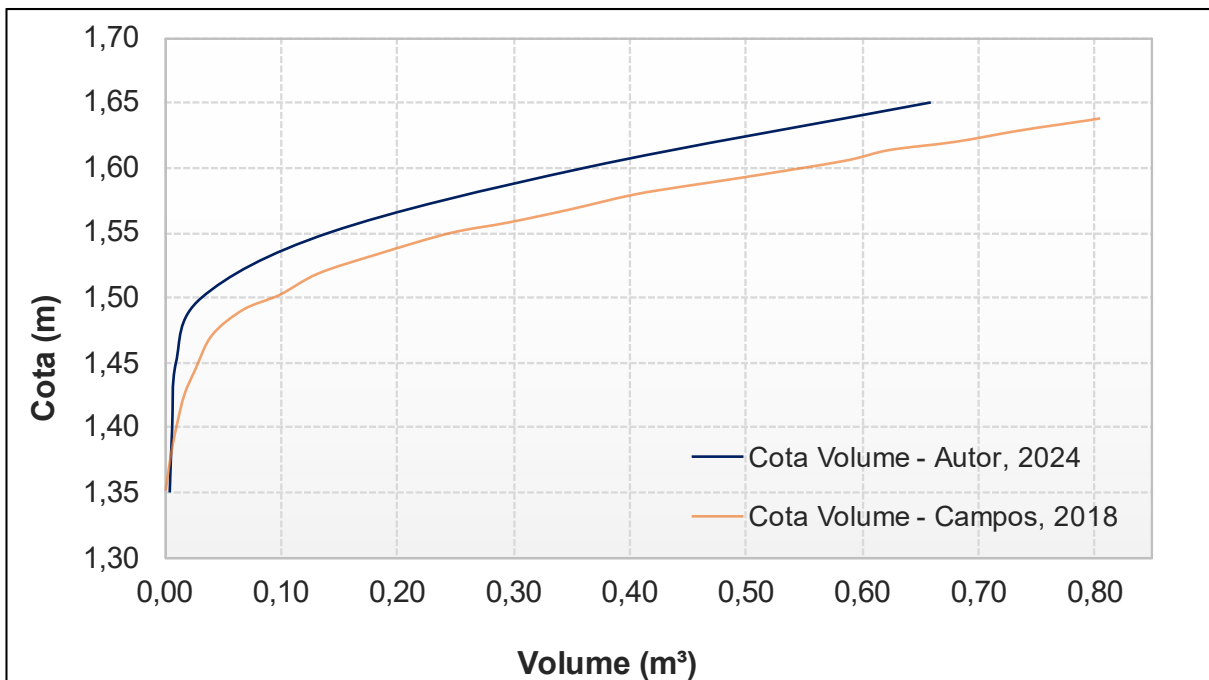


Fonte: Autor (2024).

5.4.4 Curva Cota x Volume

Foi obtida a curva Cota x Volume do reservatório mediante a topografia disponibilizada no âmbito deste estudo. Observou-se diferenças em relação àqueles volumes obtidos no trabalho de Campos, (2018), conforme Figura 23.

Figura 23 – Curvas Cota x Volume do modelo reduzido da PCH Salto Paraopeba



Fonte: Autor (2024).

Portanto, para simular as condições experimentais de um cenário assoreado, onde aproximadamente 300 litros de borracha foram introduzidos no reservatório, 45,5% do reservatório estaria assoreado, considerando a topografia disponibilizada para o estudo atual.

5.4.5 Condições iniciais e de contorno

As seguintes condições iniciais e de contorno foram estabelecidas:

Calibração e validação:

- Cenário 1: (TR = 1,01 anos; Q = 50,5 m³/h) e reservatório limpo
- Cenário 2: (TR ~5 anos; Q = 275 m³/h) e reservatório limpo

A calibração da rugosidade foi realizada nas condições de reservatório limpo para as duas vazões de referência (Cenário 1 e 2) e a validação foi realizada para o Cenário 1 sob vazão que representa as cheias ordinárias.

Sabendo-se que o modelo computacional tridimensional FLOW-3D HYDRO® utiliza alturas de rugosidade, K_s , para a representação da rugosidade nas superfícies, foi preciso obter a correspondência dessas alturas conforme valores de Manning, segundo equações (69) e (70). Durante a realização dos testes com diferentes vazões no modelo físico reduzido no âmbito do trabalho de Campos (2018), foram determinados os valores de Manning correspondentes a 0,012, 0,018 e 0,030. O autor conduziu simulações no programa HEC-RAS, em ambiente bidimensional, para a calibração e validação do coeficiente de rugosidade. O valor mais próximo da realidade na condição do reservatório assoreado foi identificado como 0,0215. Assim, foram escolhidos os valores de Manning de 0,018, 0,0215 e 0,030 para a calibração do estudo atual, juntamente com o valor de 0,040, numa tentativa de alcançar resultados mais congruentes com a curva de descarga medida.

A Tabela 2 apresenta os valores de rugosidade utilizados para calibração do modelo:

Tabela 2 – Rugosidades definidas para calibração da rugosidade

Altura de rugosidade do modelo K_s (m)	Manning n	
	Modelo	Protótipo
0,010	0,018	0,033
0,024	0,021	0,040
0,080	0,030	0,055
0,190	0,040	0,074

Fonte: Autor (2024).

Transporte de sedimentos:

- Cenário 3: Cheias ordinárias (TR = 1,01 anos; Q = 50,5 m³/h) e reservatório 45,5% assoreado
 - Parâmetro crítico de Shields: 0,035 – obtido por Campello (2017);

- Cálculo da descarga de sedimentos: equação de Meyer Peter & Muller;
- Frações de sedimentos: sedimento 1 - diâmetro de 0,002 m e sedimento 2 – 0,003 m, na proporção de 50% de cada fração;
- Peso específico dos grãos: 1.140 kg/m³ – obtida experimentalmente no Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG;
- Ângulo de repouso: 36° – obtido por Campello (2017);
- Condição inicial de sedimentos no fundo: no limite da calha, aproximando-se do obtido experimentalmente, sem entrada adicional de sedimentos suspensos.

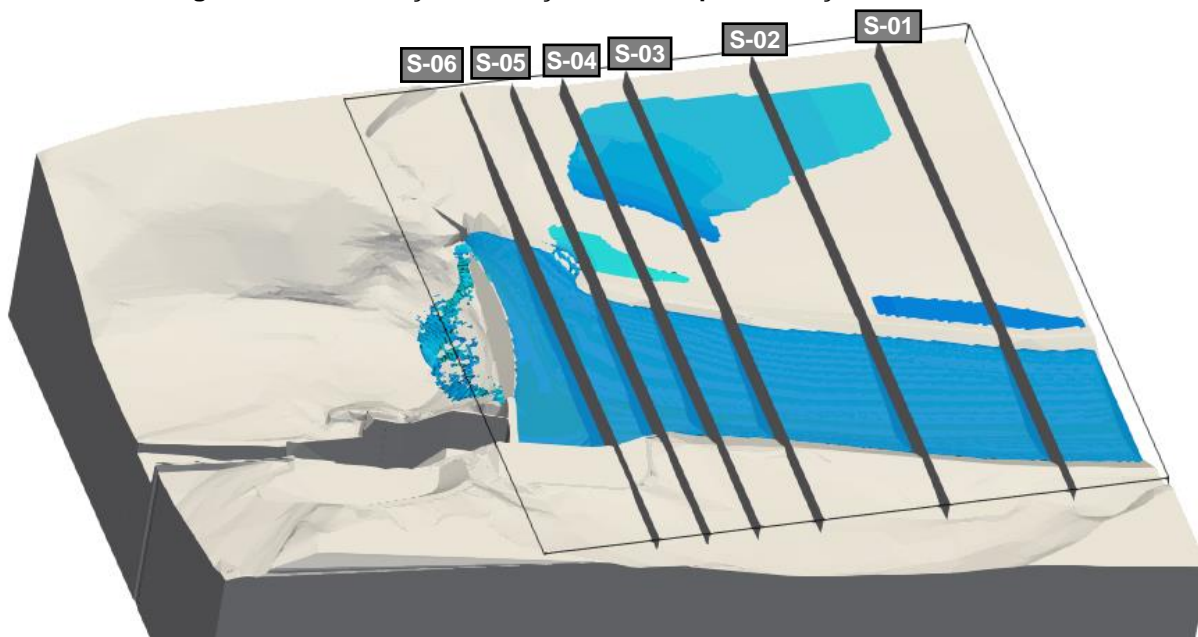
Módulos físicos:

- Gravity and Non-Inertial Reference: Ativou-se somente o módulo da gravidade para todos os cenários simulados, inserindo-se um componente Z representando a aceleração da gravidade igual a $-9,81 \text{ m/s}^2$.
- Sediment Transport: Ativo no Cenário 3.
- Variable Density Flow: Ativo no Cenário 3.
- Viscosity and Turbulence: Ativo em todos os cenários, cujo modelo de turbulência escolhido foi o “*Renormalized Group (RNG)*” sendo o mais indicado para transporte de sedimentos, conforme o manual FLOW-3D (2023).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para uma observação mais detalhada dos resultados das simulações foram inseridas 6 seções fluviais no modelo conforme Figura 24. A partir dessas seções é possível verificar a distribuição em duas dimensões dos resultados das variáveis selecionadas para análise, quais sejam: velocidade (m/s); concentração de sedimentos suspensos (kg/m³); e a variação líquida da elevação do sedimento compactado (m).

Figura 24 – Localização das seções fluviais para extração de resultados



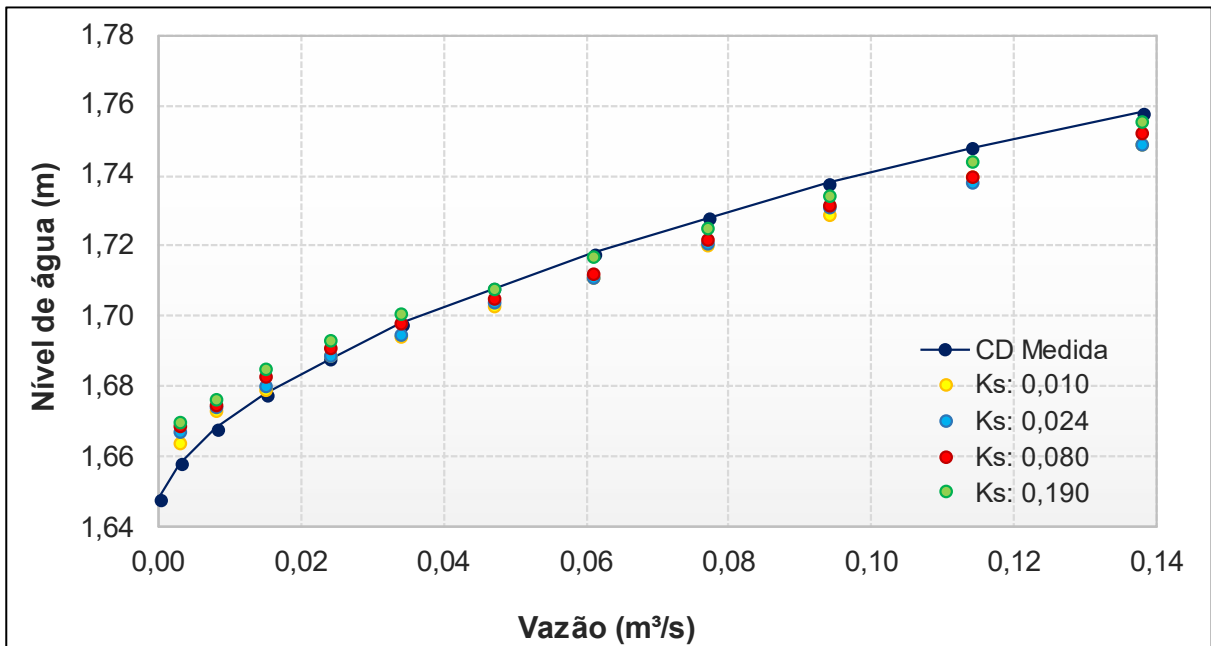
Fonte: Autor (2024).

6.1 Calibração da rugosidade

A curva de descarga medida no reservatório do modelo físico reduzido foi realizada no âmbito do trabalho de Campos (2018). A partir da topografia disponibilizada, verificou-se que o vertedor está na elevação 1,66 m, sendo que o fundo do reservatório a montante, onde foram obtidas as medições de nível d'água, varia de aproximadamente 1,47 a 1,55 m, ou seja, uma altura de aproximadamente 0,10 a 0,20 m. Verifica-se que a altura do vertedor em relação a jusante é de aproximadamente 0,40 m, fundo está sob elevação de 1,26 m.

A calibração da rugosidade no modelo hidráulico computacional consistiu na comparação desta curva de descarga medida com as curvas obtidas nas simulações, à medida que as alturas de rugosidade foram modificadas. As curvas resultantes, juntamente com as métricas de erro médio calculadas, são apresentadas na Figura 25 e Tabela 3, respectivamente.

Figura 25 – Curva de descarga medida no modelo reduzido x curvas obtidas nas simulações



Fonte: Autor (2024).

Tabela 3 – Métricas de erro relacionando a curva de descarga medida às simuladas

Altura de rugosidade	MAE	MSE	RMSE	MAPE (%)
Ks: 0,010	0,00573	0,00004	0,00635	0,00334
Ks: 0,024	0,00591	0,00004	0,00657	0,00345
Ks: 0,080	0,00555	0,00004	0,00620	0,00325
Ks: 0,190	0,00452	0,00003	0,00559	0,00267

Fonte: Autor (2024).

Nota-se que os resultados que mais se aproximam da curva de descarga medida no modelo reduzido são aqueles que foram submetidos a $K_s = 0,19$. As profundidades do fluxo variam de 0,12 a 0,28 m, em relação ao fundo do reservatório. Conforme equações (69) e (70), essas profundidades correspondem ao valor médio de Manning de aproximadamente 0,040. Este valor é tipicamente associado a revestimentos de alvenaria de pedras ou revestimento com vegetação baixa, conforme Chow (1988) ou enrocamento de cascalho, conforme Chaudhry (2008).

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 na Figura 26 a Figura 33.

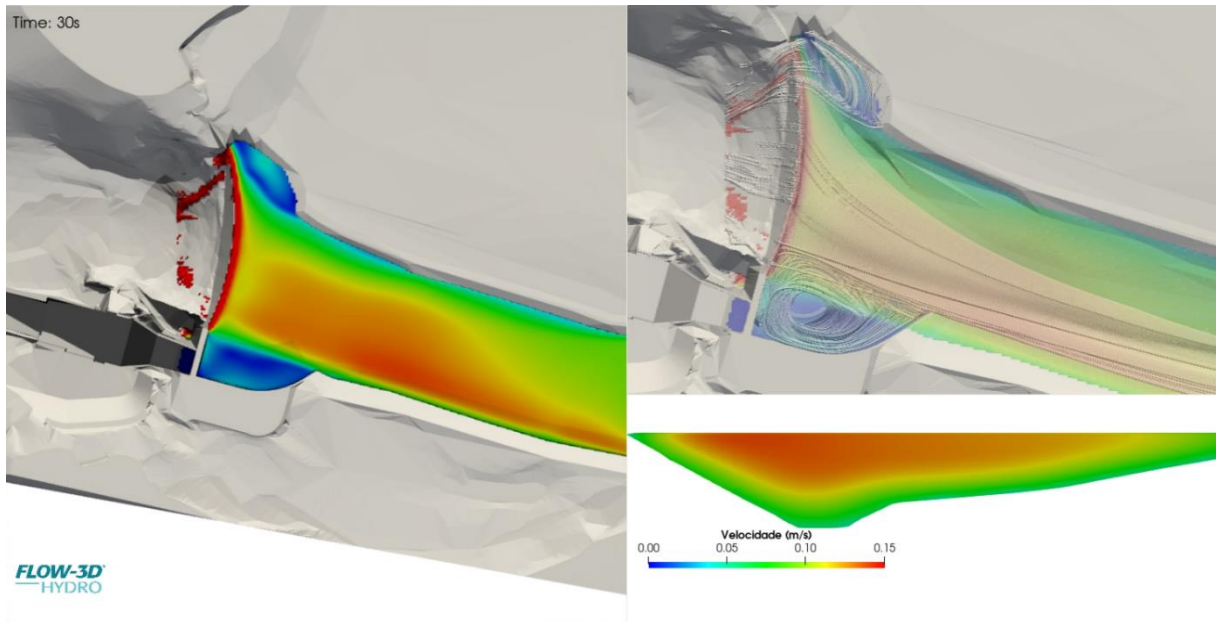
Observou-se que o modelo começa a se estabilizar aproximadamente aos 25 segundos; portanto, essas simulações foram interrompidas no tempo correspondente a 30 segundos.

As figuras foram estruturadas da seguinte forma: à esquerda se verifica o padrão de escoamento na direção z (visto de cima), à direita as linhas de fluxo na direção do barramento. Um corte de seção no centro do reservatório abaixo desta permite visualizar o padrão nas direções x e y.

No Cenário 1, a escala gráfica foi fixada em 0 a 0,15 m/s em todas as três simulações a fim de facilitar a comparação. Já para o Cenário 2, a escala foi ajustada para variar de 0 a 0,60 m/s, sendo ambas as escalas aderentes a faixa de velocidade obtidas para cada cenário simulado.

A Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29 apresentam os resultados das simulações para o Cenário 1, variando-se as alturas de rugosidade.

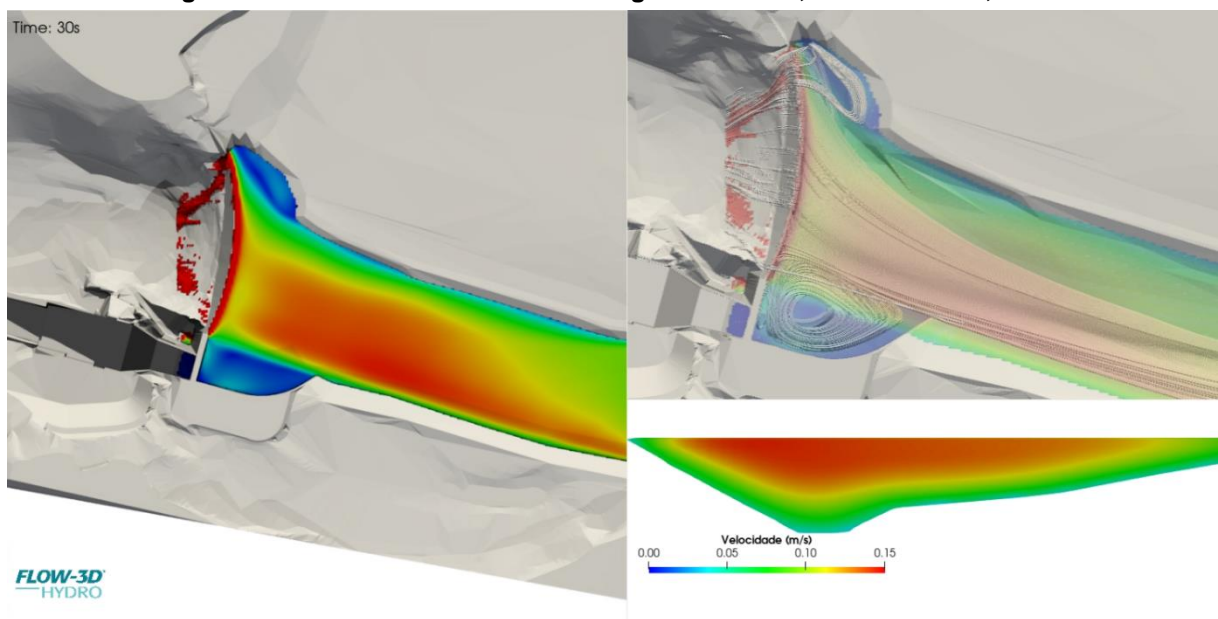
Figura 26 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,010 – Vazão 50,5 m³/h



Fonte: Autor (2024).

Para a simulação com $K_s = 0,010$ (Figura 26) se observa 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. Na área central, por outro lado, são notadas velocidades mais altas, o que sugere uma propensão à formação de zonas de erosão.

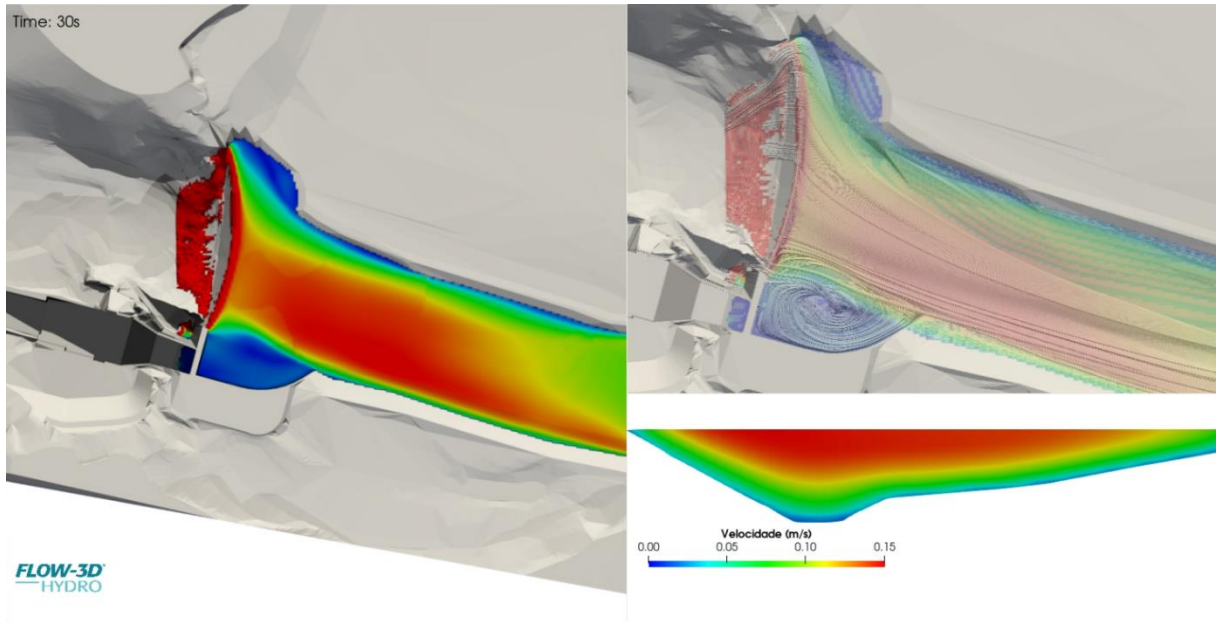
Figura 27 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,024 – Vazão 50,5 m³/h



Fonte: Autor (2024).

Observa-se pela Figura 27 que o padrão de escoamento é similar ao anterior, incluindo a formação de vórtices. Contudo, devido à maior altura de rugosidade, $K_s = 0,024$, as velocidades mais elevadas são identificadas de forma mais pronunciada.

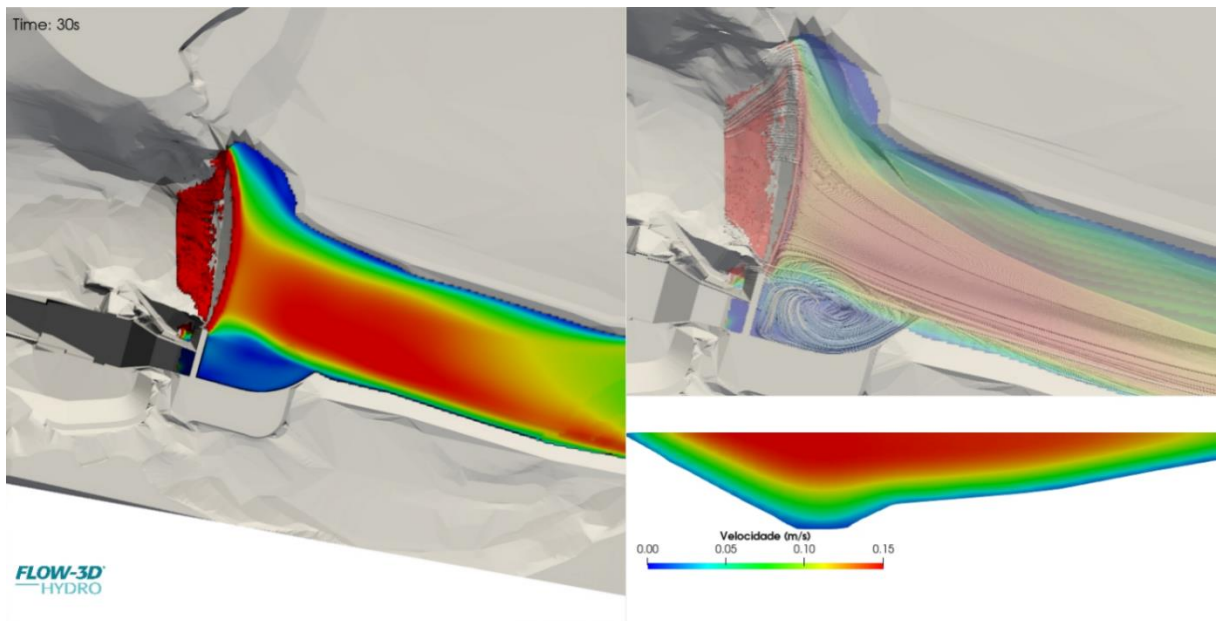
Figura 28 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,080 – Vazão 50,5 m³/h



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 28 as velocidades se intensificam, seguindo o mesmo padrão de escoamento já observado nas simulações anteriores.

Figura 29 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,19 – Vazão 50,5 m³/h

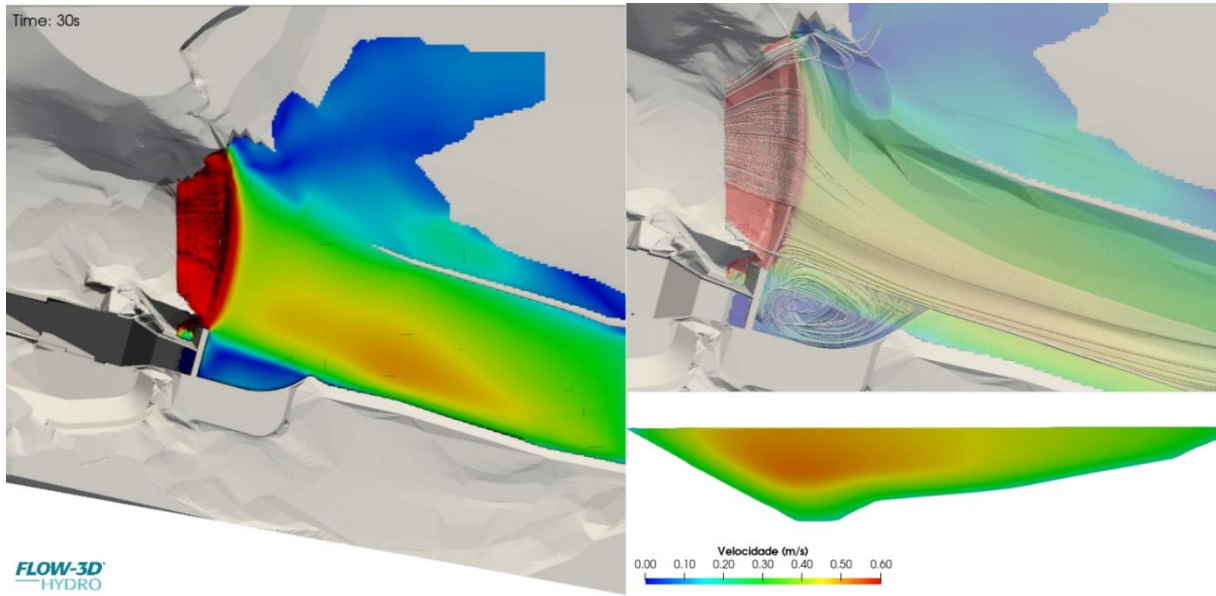


Fonte: Autor (2024).

Sob a altura de rugosidade $K_s = 0,19$ (Figura 29), como esperado, são verificadas velocidades altas em uma área maior do reservatório.

Na sequência, são apresentadas a Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 33 com os resultados das simulações para o Cenário 2, variando-se as alturas de rugosidade.

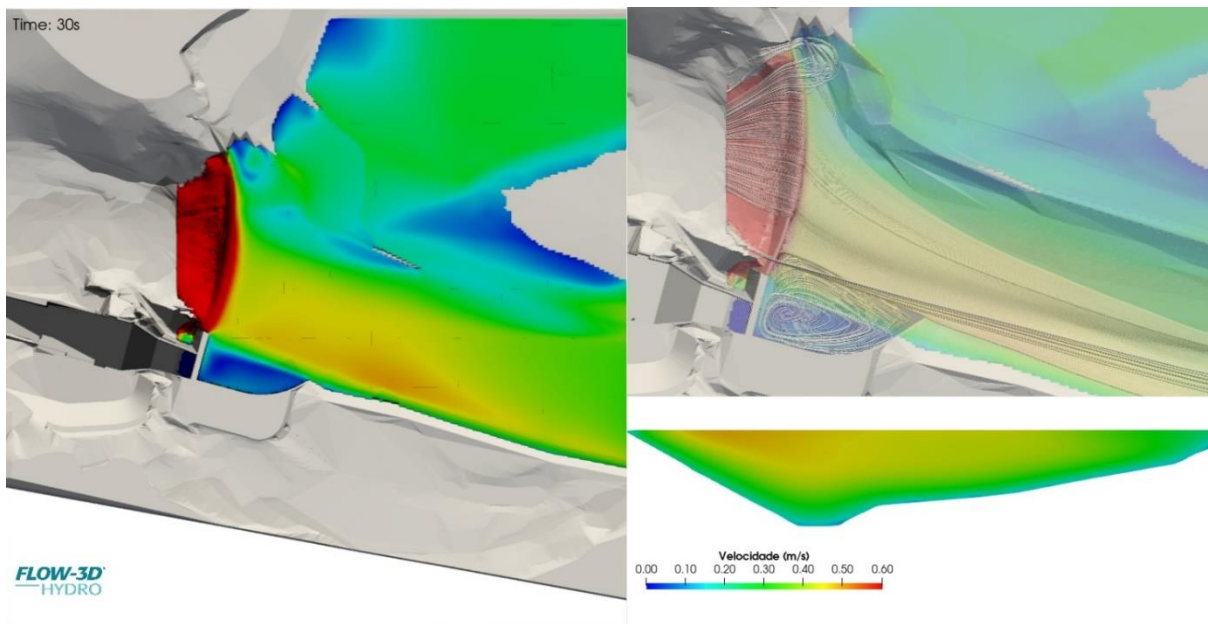
Figura 30 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,010 – Vazão 275,0 m³/h



Fonte: Autor (2024).

No Cenário 2 (Figura 30), a área ocupada pelo fluido é ampliada 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.

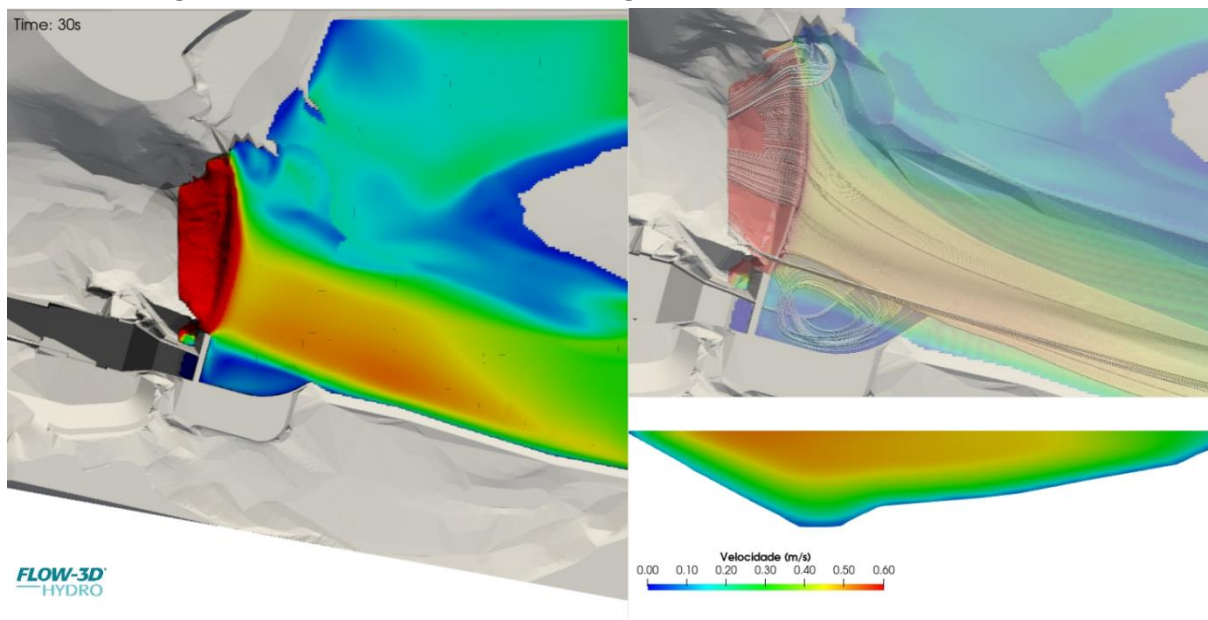
Figura 31 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,024 – Vazão 275,0 m³/h



Fonte: Autor (2024).

O padrão de escoamento permanece praticamente inalterado na Figura 31, mesmo com a altura de rugosidade aumentada. São observadas velocidades ligeiramente superiores na parte inferior, mais próxima ao canal de aproximação, no centro do reservatório.

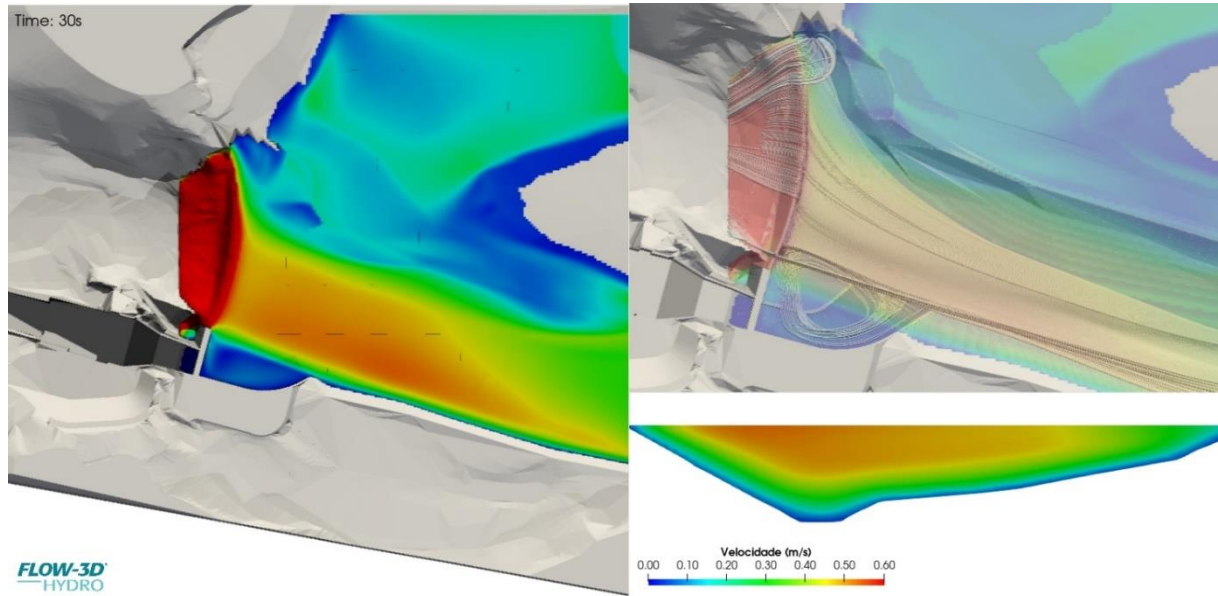
Figura 32 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,080 – Vazão 275,0 m³/h



Fonte: Autor (2024).

Com base na Figura 32, é evidente uma região no reservatório com velocidades mais altas, especialmente na metade direcionada para jusante. Esta área é mais pronunciada na região inferior, próxima ao canal de aproximação.

Figura 33 – Velocidade sob altura de rugosidade de 0,19 – Vazão 275,0 m³/h



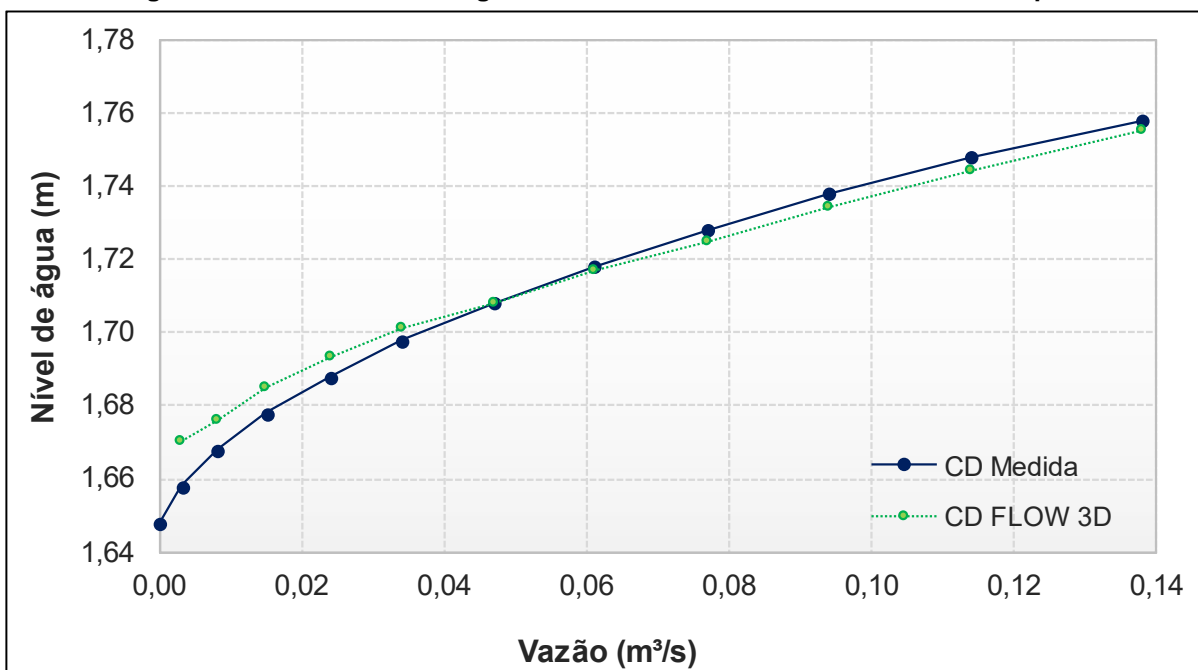
Fonte: Autor (2024).

Na Figura 33 também se destaca uma área caracterizada por velocidades mais elevadas na metade do reservatório em direção a jusante, sendo a região inferior, mais próxima ao canal de aproximação, especialmente pronunciada.

6.2 Curva de descarga

A curva de descarga associada às simulações realizadas com $K_s = 0,19$ está representada na Figura 34. Esta curva foi escolhida para dar continuidade às simulações no modelo computacional, uma vez que apresenta uma maior proximidade com a curva medida em termos gerais, já que as métricas de erro calculadas indicaram valores finais mais baixos, conforme descrito no item 6.1.

Figura 34 – Curvas de descarga do modelo reduzido da PCH Salto do Paraopeba



Fonte: Autor (2024).

A partir da Figura 34, verifica-se que o modelo numérico apresenta comportamento condizente com o modelo físico, apresentando variações, dada as limitações em se reproduzir exatamente as condições experimentais. Isso porque os modelos numéricos utilizam aproximações e simplificações nos cálculos computacionais para representação de um sistema físico, conforme 4.4, além das restrições de resolução da malha computacional, restrições quanto a representação de turbulências, instabilidade numérica, dentre outros.

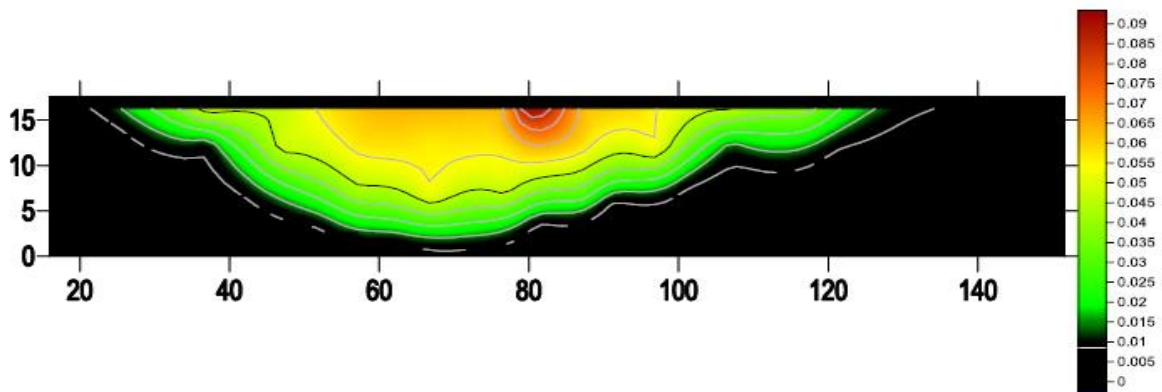
6.3 Comparação dos resultados de velocidade nas seções

Para verificação das simulações sob $K_s = 0,19$ nos Cenários 1 e 2, foram comparados os perfis de velocidade nas seções fluviais com os perfis de velocidade obtidos por meio da interpolação das medições no modelo reduzido. No entanto, a comparação visual desses resultados se limita devido à impossibilidade de submeter os resultados às mesmas escalas gráficas daquelas definidas por Campos (2018). Além disso, sabe-se que a realização de medições implica em incertezas, então, espera-se que haja divergências nessa comparação.

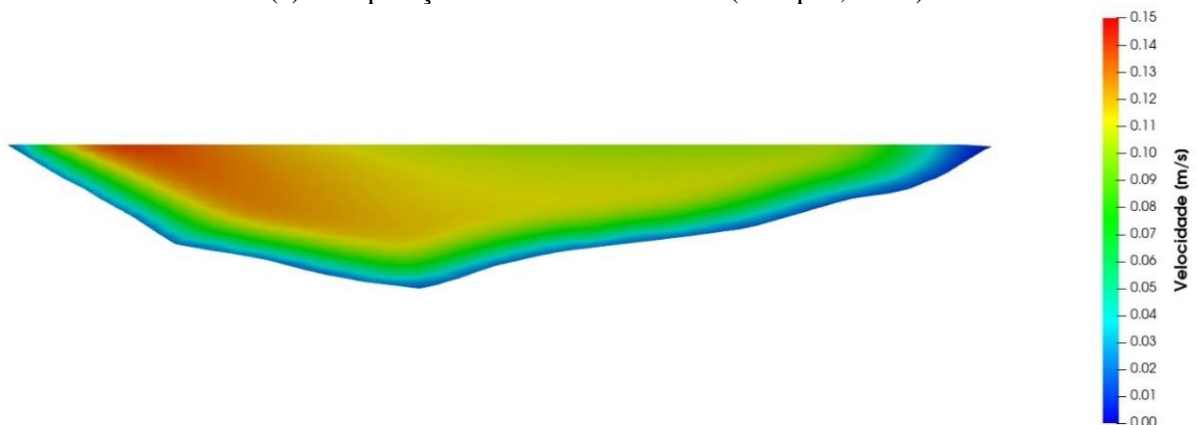
6.3.1 Comparação entre as seções medidas e simuladas – Cenário 1

Os gráficos dos resultados nas seções fluviais do modelo numérico, comparadas aos medidos para o Cenário 1 podem ser verificados na sequência, Figura 35 a Figura 40. A Figura 35 mostra o mapa de velocidades da seção 1 onde (a) são as medidas realizadas por Campos (2018) e (b) a simulação computacional.

Figura 35 – Velocidade na seção S-01 – Cenário 1 – Vazão 50,5m³/h



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



(b) Velocidades obtidas no modelo FLOW-3D HYDRO (Autor, 2024).

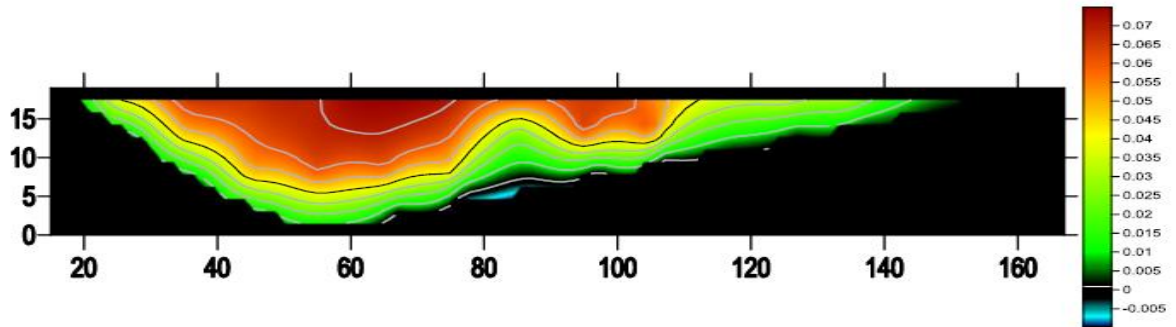
A similaridade no padrão de escoamento é perceptível na seção S-01, destacada em tons de verde nas figuras, com velocidades variando aproximadamente de 0,02 a 0,045 m/s na seção medida e de 0,05 a 0,10 m/s na seção do modelo. Apesar da limitação dessa comparação visual, é evidente que as velocidades simuladas superam as medidas.

Além disso, a área com velocidades mais altas (em tons de laranja a vermelho) é notavelmente restrita na seção medida em comparação com a simulada, possivelmente devido às limitações da interpolação a partir de medições pontuais

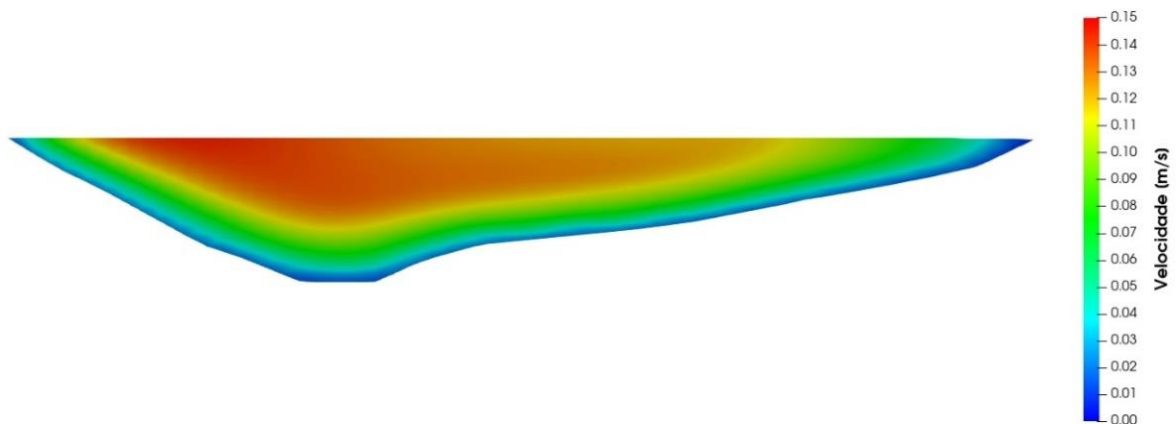
nessa seção ou possíveis interferências no fundo do reservatório nessa seção. Não foi verificada alteração na topografia nessa região.

A Figura 36 mostra o mapa de velocidades da seção 2 onde (a) são as medidas realizadas por Campos (2018) e (b) a simulação computacional.

Figura 36 – Velocidade na seção S-02 – Cenário 1 – Vazão 50,5m³/h



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

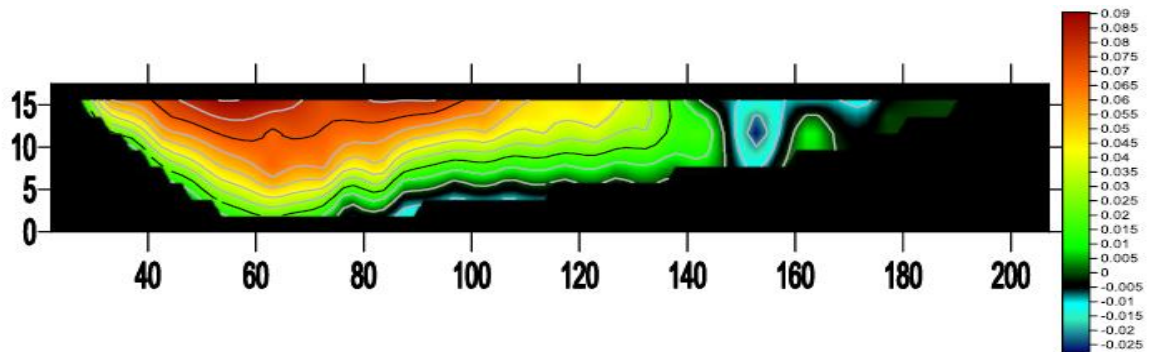


(b) Velocidades obtidas no modelo FLOW-3D HYDRO (Autor, 2024).

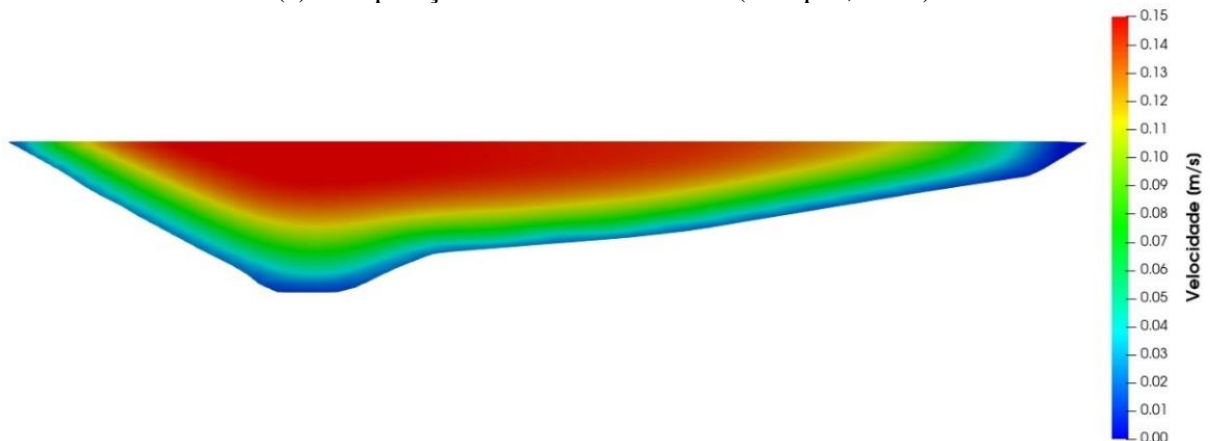
A partir da Seção S-02, a semelhança no padrão de escoamento torna-se mais evidente, apesar da limitação da visualização devido à escala gráfica. A seção do modelo exibe uma distribuição de velocidades um tanto mais uniforme. Pode-se inferir que a interpolação dos valores medidos pode resultar em variações inexistentes na ausência de pontos medidos nesses intervalos, como evidenciado, por exemplo, na falta de indícios de variação topográfica entre as posições 80 e 100 na seção medida.

A Figura 37 mostra o mapa de velocidades da seção S-03 onde (a) são as medidas realizadas por Campos (2018) e (b) a simulação computacional.

Figura 37 – Velocidade na seção S-03 – Cenário 1 – Vazão 50,5m³/h



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

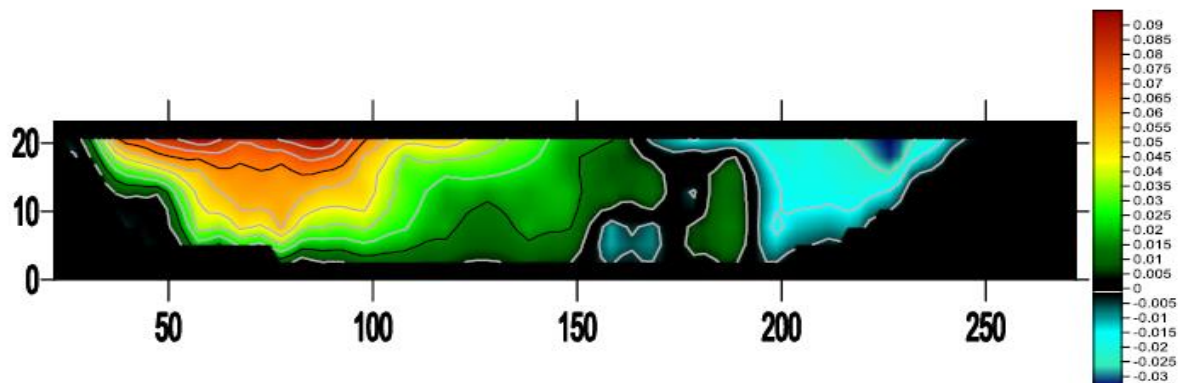


(b) Velocidades obtidas no modelo FLOW-3D HYDRO (Autor, 2024).

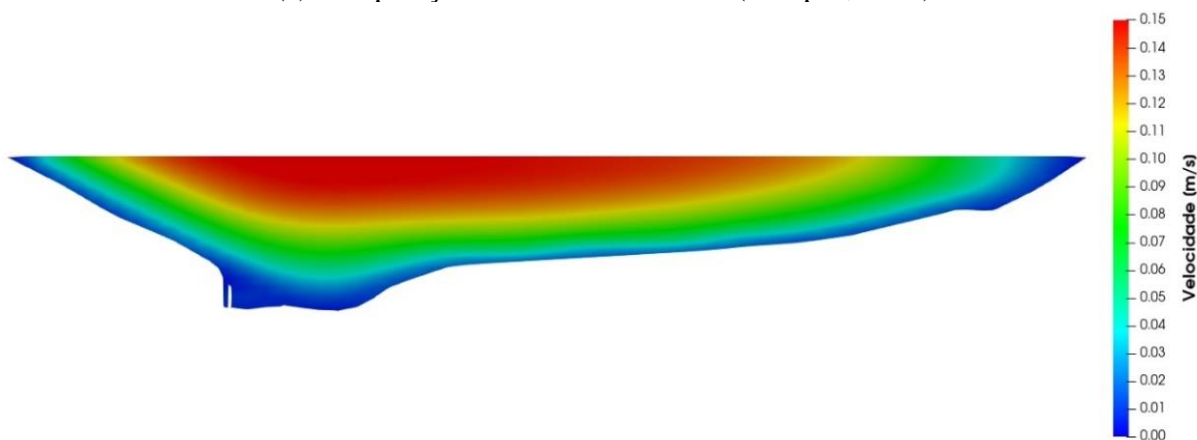
A avaliação da Seção S-03 segue a mesma linha de raciocínio da seção anterior, mas com valores ligeiramente mais elevados, uma vez que essa seção está mais próxima do barramento, praticamente no centro do reservatório. Na seção medida, observa-se um padrão discrepante de velocidades a partir da distância 140, são verificadas velocidades extremamente baixas, nulas e negativas, inferindo-se que o escoamento nessa região pode ocorrer na direção oposta (região de recirculações).

A Figura 38 mostra o mapa de velocidades da seção 4 onde (a) são as medidas realizadas por Campos (2018) e (b) a simulação computacional.

Figura 38 – Velocidade na seção S-04 – Cenário 1 – Vazão 50,5m³/h



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

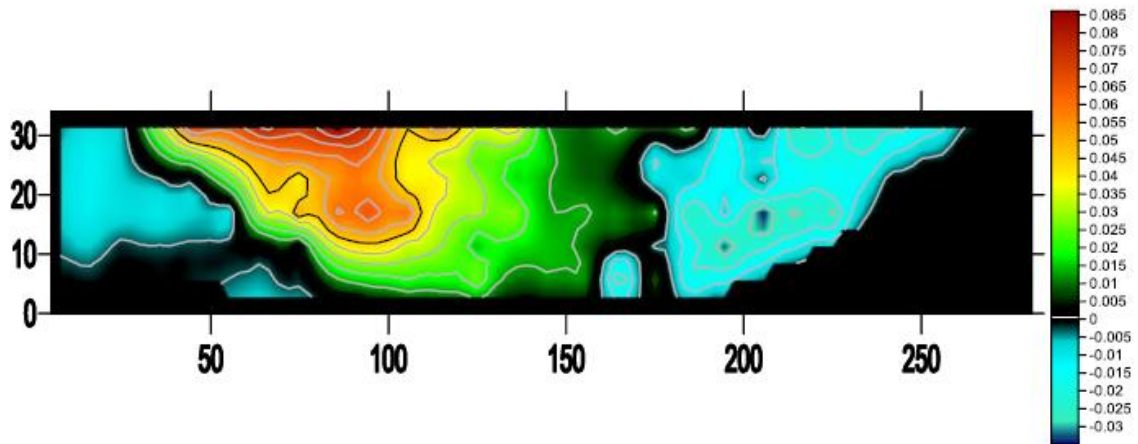


(b) Velocidades obtidas no modelo FLOW-3D HYDRO (Autor, 2024).

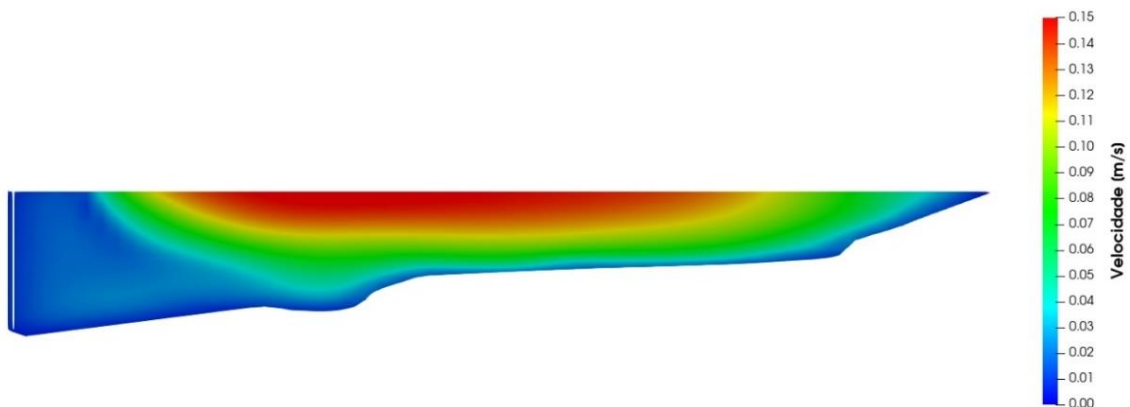
A seção S-04 medida apresenta de forma mais evidente essa divergência do padrão de escoamento.

A Figura 39 mostra o mapa de velocidades da seção 5 onde (a) são as medidas realizadas por Campos (2018) e (b) a simulação computacional.

Figura 39 – Velocidade na seção S-05 – Cenário 1 – Vazão 50,5m³/h



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

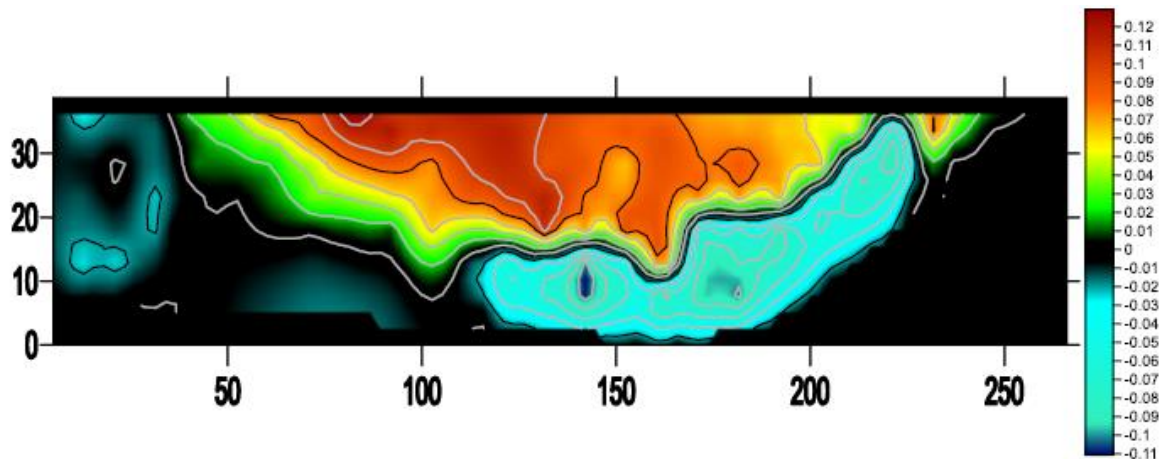


(b) Velocidades obtidas no modelo FLOW-3D HYDRO (Autor, 2024).

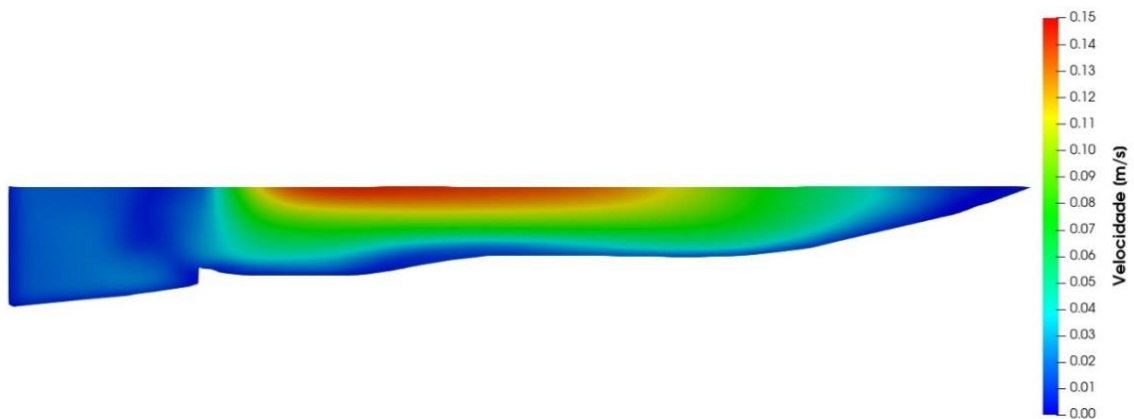
A Seção S-05 está posicionada no início do canal de aproximação, e a partir da simulação, são evidenciadas velocidades extremamente baixas e/ou nulas nessa região. Na seção medida, também é perceptível a identificação do canal à esquerda, com velocidades nulas e até negativas, indicando possível contrafluxo. Esse padrão de escoamento é observado também na região à direita dessa seção, o que praticamente não acontece na seção simulada. Contudo, na análise em planta da simulação, item 6.1, foi possível observar a formação de vórtices nessas regiões.

A Figura 40 mostra o mapa de velocidades da seção 6 onde (a) são as medidas realizadas por Campos (2018) e (b) a simulação computacional.

Figura 40 – Velocidade na seção S-06 – Cenário 1 – Vazão 50,5m³/h



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



(b) Velocidades obtidas no modelo FLOW-3D HYDRO (Autor, 2024).

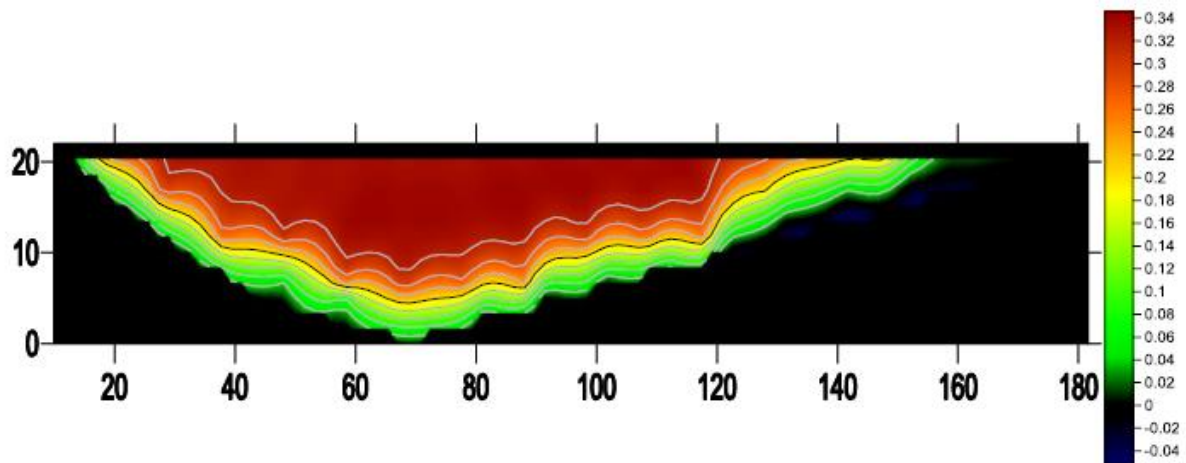
A seção S-06 medida se difere bastante da seção proveniente da simulação. É possível perceber a região relativa ao canal de aproximação à esquerda, com velocidades baixas e nulas, na seção medida têm-se valores negativos, e se verifica uma grande região à direita com velocidades negativas. Na seção simulada não são verificadas velocidades negativas, porém na análise em planta, item 6.1, foi possível observar a formação de vórtices nessas regiões.

6.3.2 Comparação entre as seções medidas e simuladas – Cenário 2

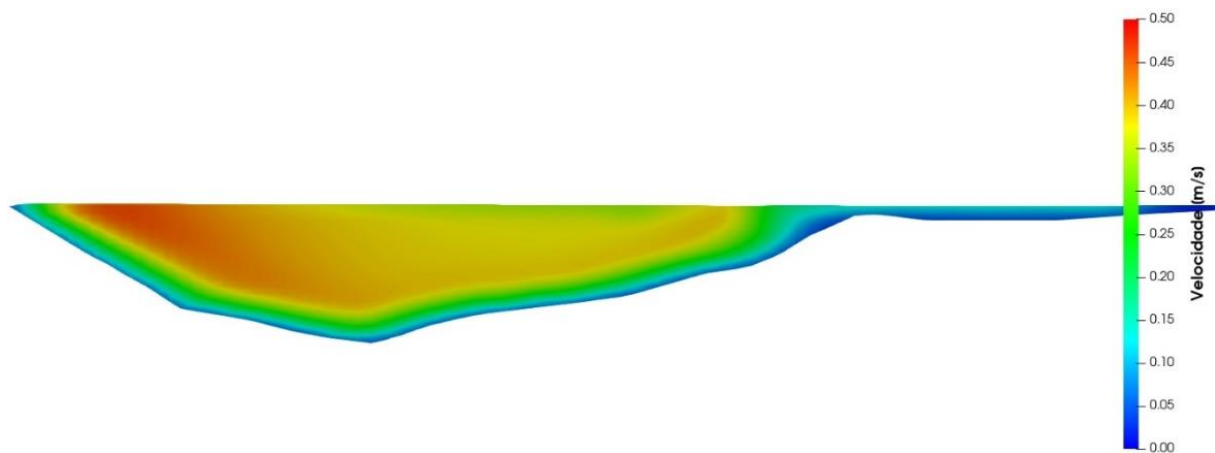
Em seguida, são apresentados os resultados nas seções referentes ao Cenário 2, Figura 41 a Figura 46.

A Figura 41 mostra o mapa de velocidades da seção 1 onde (a) são as medidas realizadas por Campos (2018) e (b) a simulação computacional.

Figura 41 – Velocidade na seção S-01 – Cenário 2 – Vazão 275m³/h



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

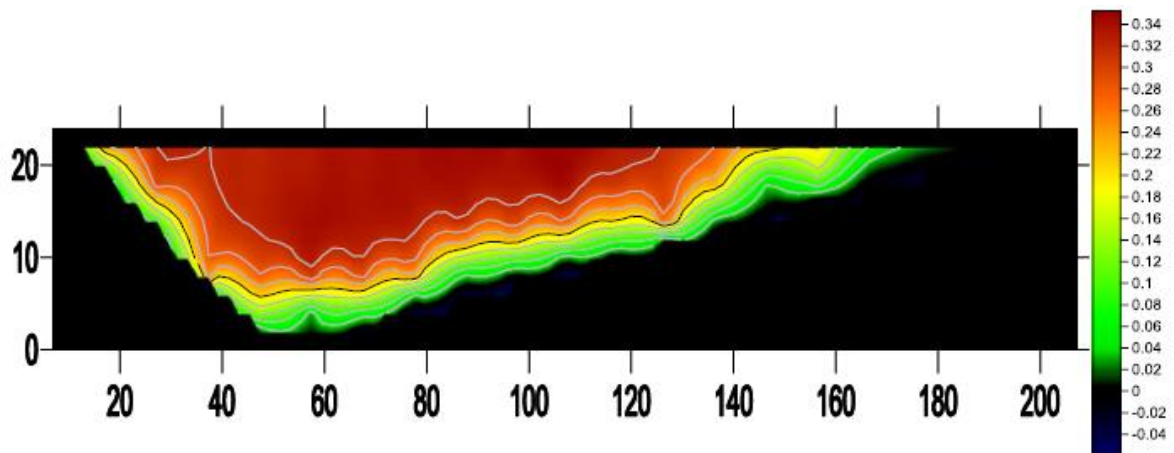


(b) Velocidades obtidas no modelo FLOW-3D HYDRO (Autor, 2024).

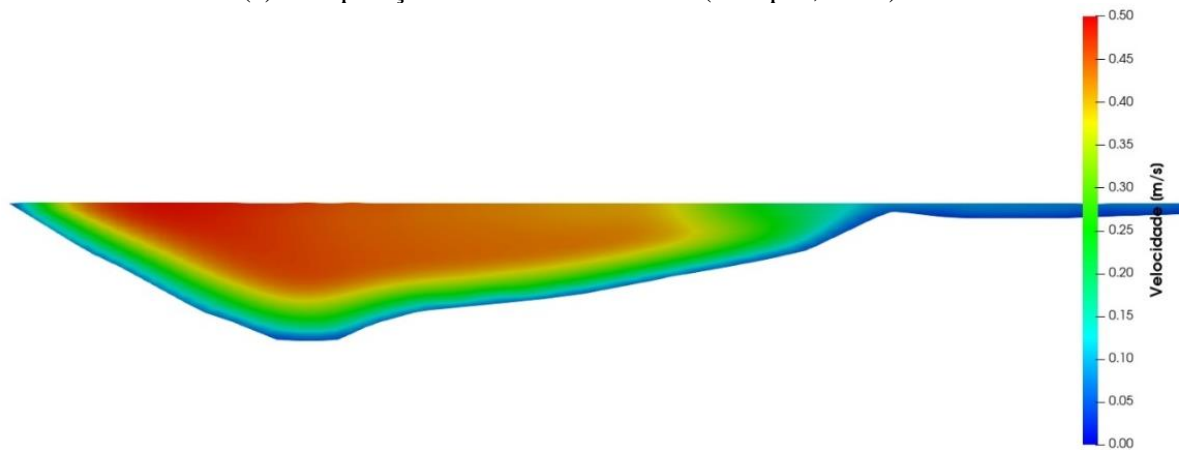
Da mesma forma que no Cenário 1, na Seção S-01, é evidente a semelhança no padrão de escoamento entre as seções. Conforme indicado pela escala gráfica na seção medida, são notadas velocidades de aproximadamente 0,30 m/s, distribuídas em grande parte dessa seção. Para este cenário simulado, não foram observadas discrepâncias na interpolação, se aproximando mais do padrão de escoamento na seção simulada. Nesta, destaca-se que na região à esquerda, as velocidades são ligeiramente mais altas, atingindo cerca de 0,50 m/s.

A Figura 42 mostra o mapa de velocidades da seção 2 onde (a) são as medidas realizadas por Campos (2018) e (b) a simulação computacional.

Figura 42 – Velocidade na seção S-02 – Cenário 2 – Vazão 275m³/h



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

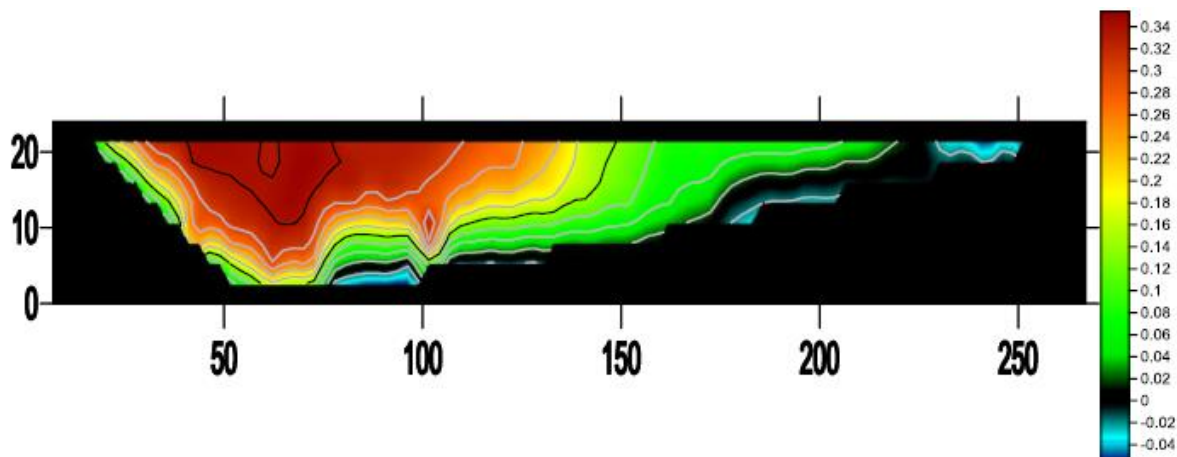


(b) Velocidades obtidas no modelo FLOW-3D HYDRO (Autor, 2024).

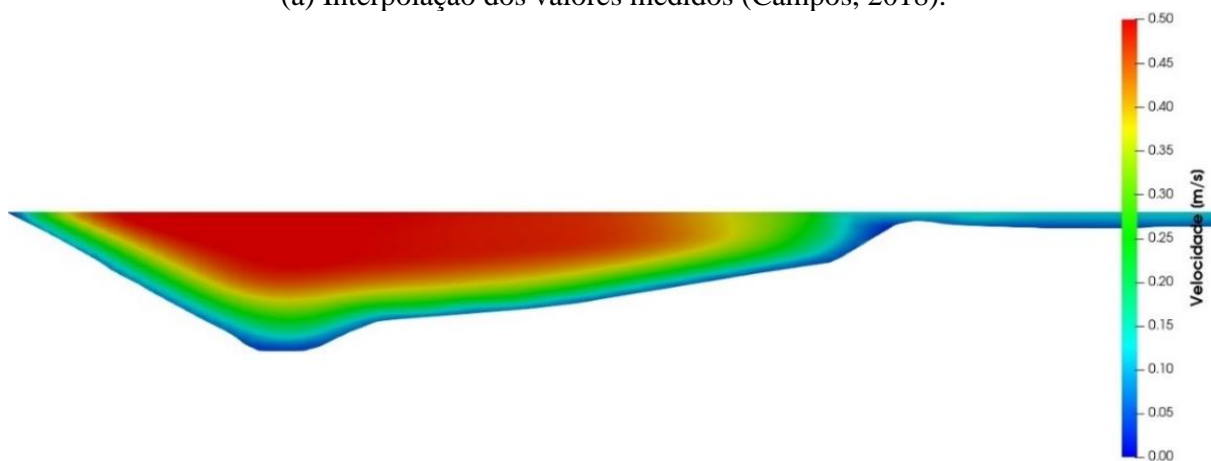
Na Seção S-02, as mesmas observações anteriores podem ser feitas, reforçando a ideia de um padrão de escoamento mais uniformemente distribuído, sem grandes flutuações.

A Figura 43 mostra o mapa de velocidades da seção S-03 onde (a) são as medidas realizadas por Campos (2018) e (b) a simulação computacional.

Figura 43 – Velocidade na seção S-03 – Cenário 2 – Vazão 275m³/h



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

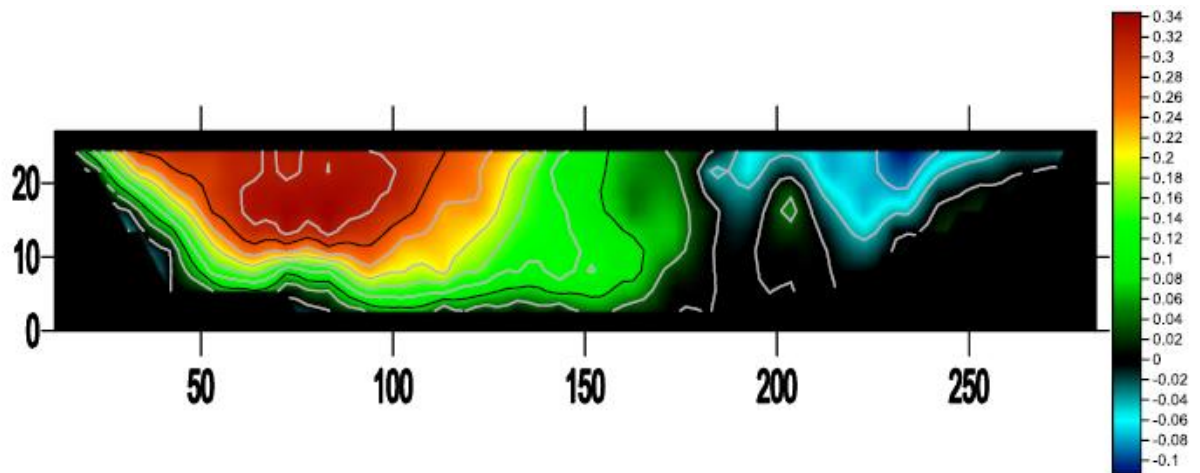


(b) Velocidades obtidas no modelo FLOW-3D HYDRO (Autor, 2024).

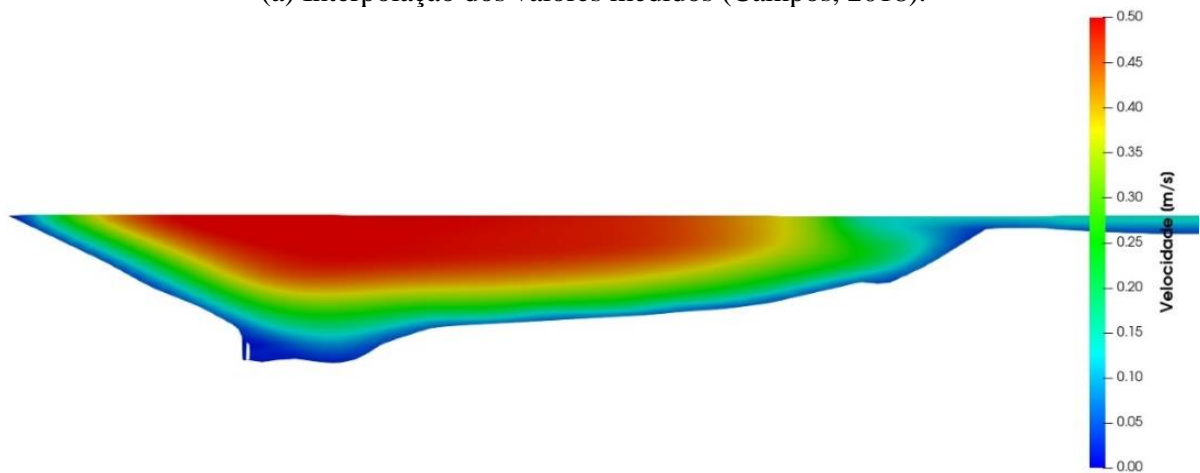
Para a Seção S-03 são observadas algumas flutuações na seção medida, porém, o padrão de escoamento é bastante próximo à condição simulada.

A Figura 44 mostra o mapa de velocidades da seção 4 onde (a) são as medidas realizadas por Campos (2018) e (b) a simulação computacional.

Figura 44 – Velocidade na seção S-04 – Cenário 2 – Vazão 275m³/h



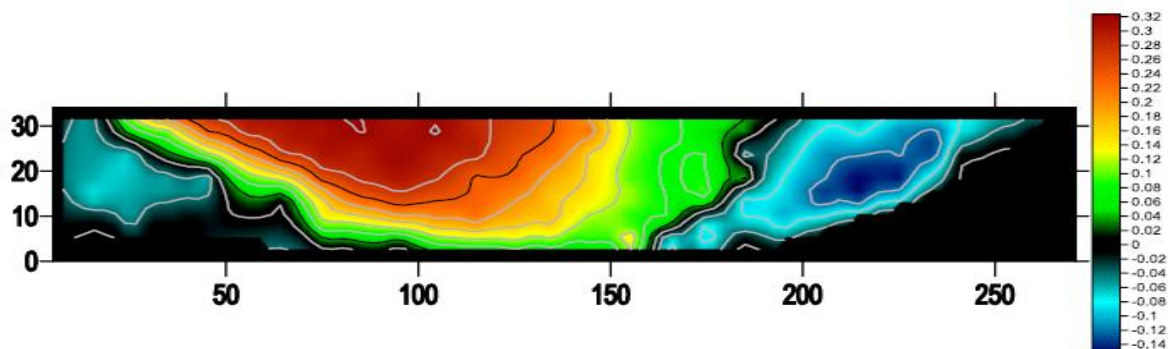
(a) Interpolação dos valores medidos (Campos, 2018).



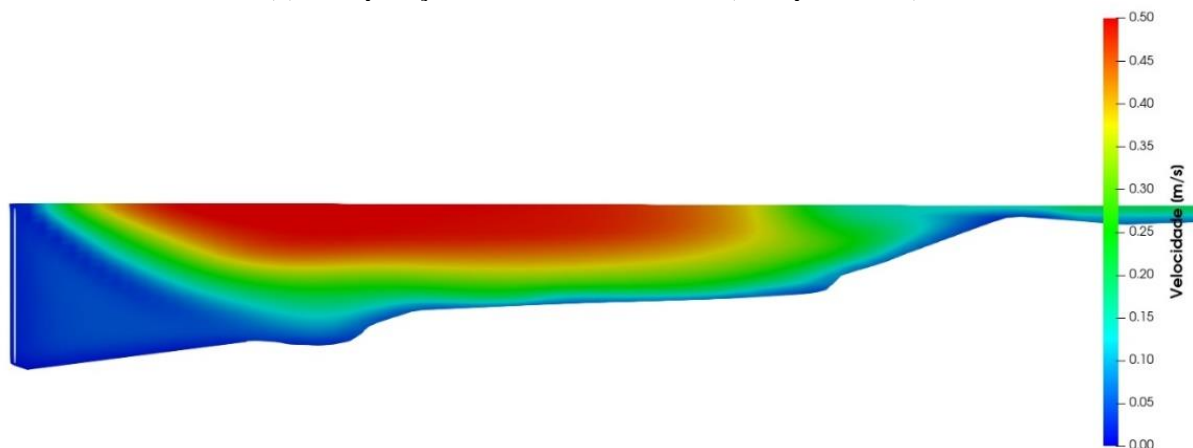
(b) Velocidades obtidas no modelo FLOW-3D HYDRO (Autor, 2024).

À medida que as seções se aproximam do canal de aproximação, em direção ao vertedouro, ou seja, a partir da Seção S-04 são observadas as maiores discrepâncias entre as seções. Além de serem verificadas velocidades nulas e negativas na região à direita, o formato desta seção é bastante diferente ao da seção simulada.

A Figura 45 mostra o mapa de velocidades da seção 5 onde (a) são as medidas realizadas por Campos (2018) e (b) a simulação computacional.

Figura 45 – Velocidade na seção S-05 – Cenário 2 – Vazão 275m³/h

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

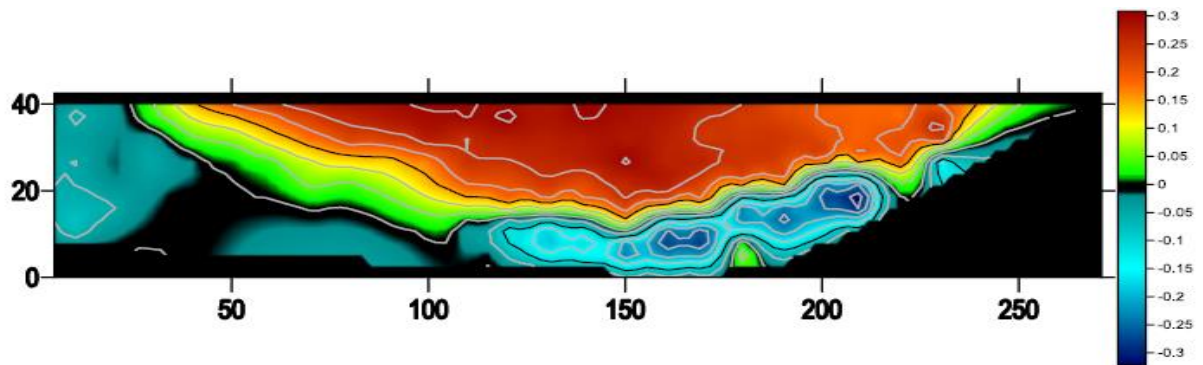


(b) Velocidades obtidas no modelo FLOW-3D HYDRO (Autor, 2024).

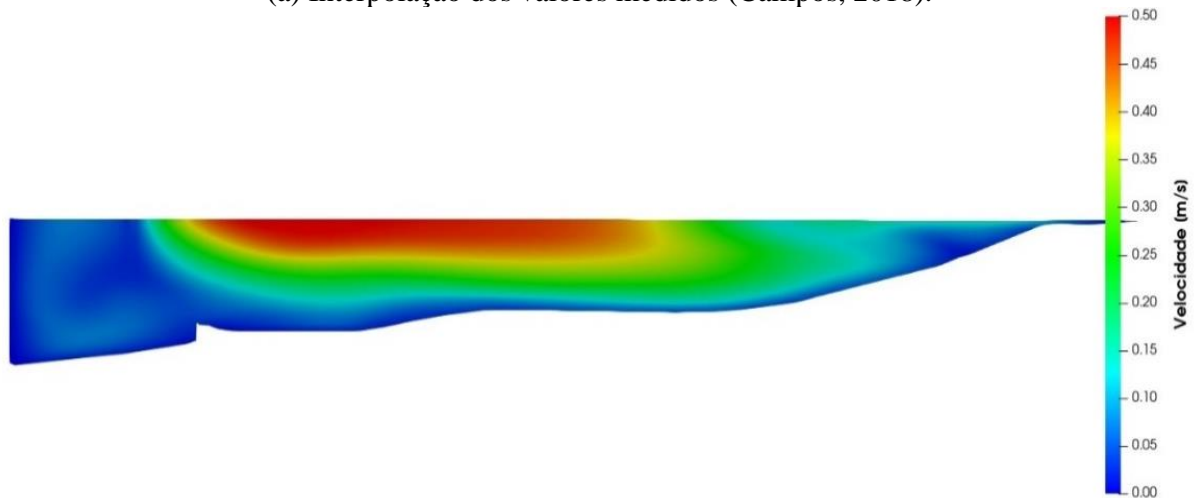
Considerações semelhantes são obtidas para a seção S-05 no que tange ao formato da seção e divergências no padrão de escoamento.

A Figura 46 mostra o mapa de velocidades da seção 6 onde (a) são as medidas realizadas por Campos (2018) e (b) a simulação computacional.

Figura 46 – Velocidade na seção S-06 – Cenário 2 – Vazão 275m³/h



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



(b) Velocidades obtidas no modelo FLOW-3D HYDRO (Autor, 2024).

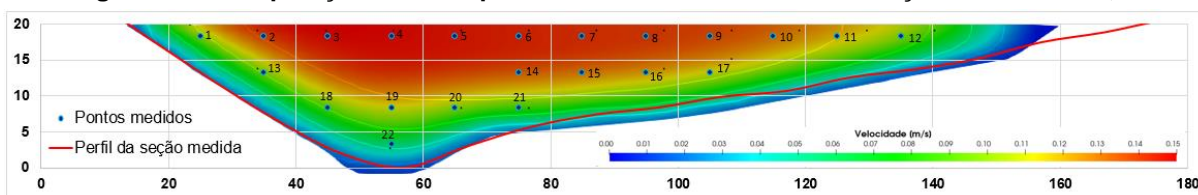
Como no Cenário anterior, a seção S-06 medida se difere bastante da seção da simulação.

Para todas as seções analisadas, em ambos os cenários, observou-se que as velocidades simuladas atingem valores que são aproximadamente o dobro das velocidades interpoladas provenientes das medições.

6.3.3 Verificação numérica das velocidades na seção S-03 – Cenário 1

Para uma análise detalhada das velocidades, a Seção S-03 foi escolhida, 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 47. Os resultados numéricos estão apresentados na Tabela 4.

Figura 47 – Comparação entre os pontos medidos e simulados na seção S-03 – $K_s = 0,19$



Fonte: Autor (2024).

Tabela 4 – Verificação numérica das velocidades do Cenário 1

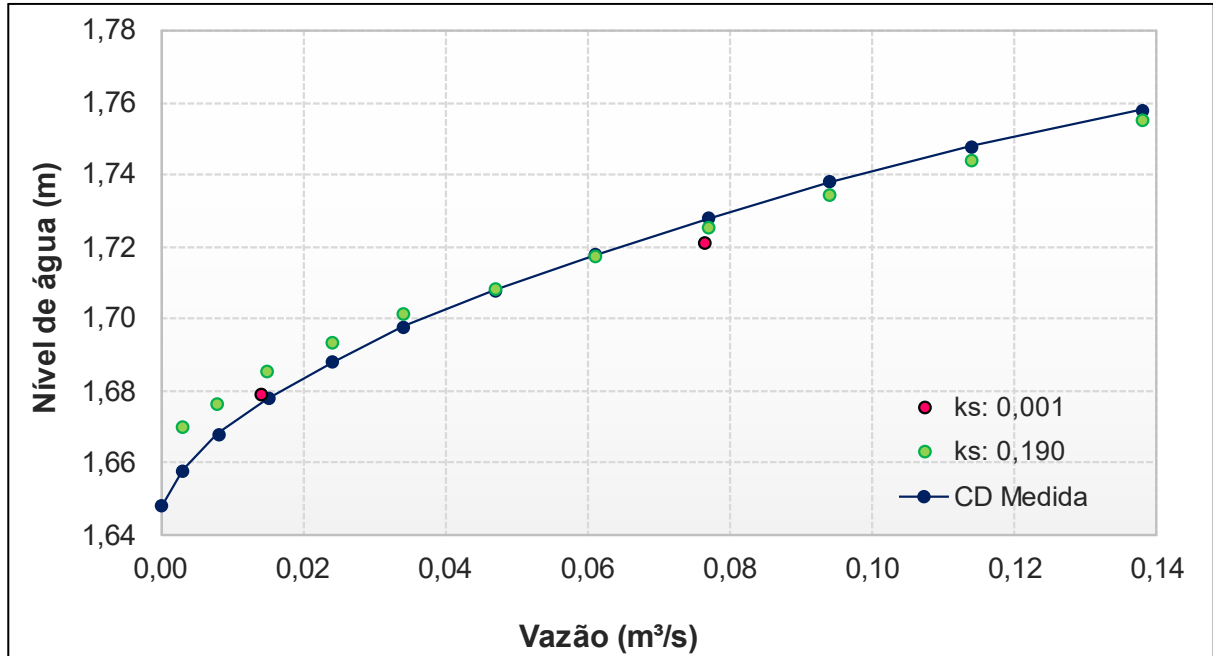
Ponto	Vx (m/s)		Diferença (%)	Vy (m/s)		Diferença (%)	Vmédia (m/s)		Diferença (%)
	Medida	Simulada		Medida	Simulada		Medida	Simulada	
1	0,041	0,105	61%	0,021	0,029	28%	0,046	0,109	58%
2	0,063	0,140	55%	0,025	0,041	38%	0,068	0,146	53%
3	0,063	0,148	57%	0,024	0,045	47%	0,068	0,155	56%
4	0,065	0,147	56%	0,025	0,046	46%	0,069	0,154	55%
5	0,080	0,144	44%	0,023	0,047	50%	0,083	0,151	45%
6	0,097	0,141	31%	0,027	0,048	44%	0,100	0,149	33%
7	0,060	0,138	56%	0,027	0,047	43%	0,066	0,146	55%
8	0,061	0,137	55%	0,023	0,047	52%	0,065	0,145	55%
9	0,049	0,134	63%	0,020	0,045	56%	0,053	0,141	62%
10	0,037	0,126	70%	0,015	0,043	65%	0,040	0,133	70%
11	0,038	0,113	66%	0,011	0,038	71%	0,040	0,119	66%
12	0,033	0,086	62%	0,011	0,029	63%	0,035	0,090	62%
13	0,048	0,095	50%	0,013	0,031	59%	0,050	0,100	50%
14	0,061	0,133	54%	0,008	0,045	82%	0,062	0,140	56%
15	0,061	0,127	52%	0,008	0,045	81%	0,062	0,135	54%
16	0,064	0,120	47%	0,004	0,044	90%	0,064	0,128	50%
17	0,060	0,118	49%	0,009	0,044	79%	0,061	0,126	51%
18	0,047	0,087	46%	0,018	0,030	41%	0,051	0,092	45%
19	0,056	0,108	48%	0,025	0,038	34%	0,062	0,114	46%
20	0,055	0,093	40%	0,020	0,037	46%	0,059	0,100	41%
21	0,041	0,079	48%	0,019	0,035	47%	0,045	0,087	48%
22	0,023	0,045	49%	0,010	0,020	50%	0,025	0,049	49%
		Mínimo	31%		Mínimo	28%		Mínimo	33%
		Máximo	70%		Máximo	90%		Máximo	70%
		Média	53%		Média	55%		Média	53%

Fonte: Autor (2024).

A partir destes valores, com relação a velocidade média obtida, é possível observar que os resultados do modelo computacional superam em cerca de 33% a 70% os medidos, conforme Tabela 4. Com base nisso, foram realizadas novas simulações, variando o valor da altura de rugosidade na tentativa de recalibrar o modelo para obter velocidades mais próximas dos valores medidos na curva de descarga. O resultado da simulação com uma altura de rugosidade de $K_s = 0,001$ m pode ser verificado na

Figura 48. Para esta altura de rugosidade, o valor de Manning corresponde a aproximadamente 0,012, podendo ser associado a revestimento liso.

Figura 48 – Resultado de nível no reservatório sob $K_s = 0,001$

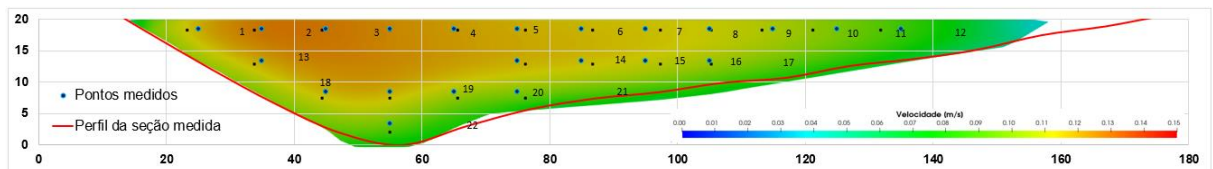


Fonte: Autor (2024).

Observa-se, a partir da Figura 48, que o nível d'água se aproxima mais do valor medido na condição do Cenário 1. Ao simular uma vazão superior no Cenário 2, o resultado do nível do reservatório pelo modelo se distancia mais do valor medido.

A localização dos pontos na seção S-03 se verifica na Figura 49 e a verificação numérica na Tabela 5.

Figura 49 – Comparação entre os pontos medidos e simulados na seção S-03 – $K_s = 0,001$



Fonte: Autor (2024).

Tabela 5 – Verificação numérica das velocidades simulação sob $K_s=0,001$

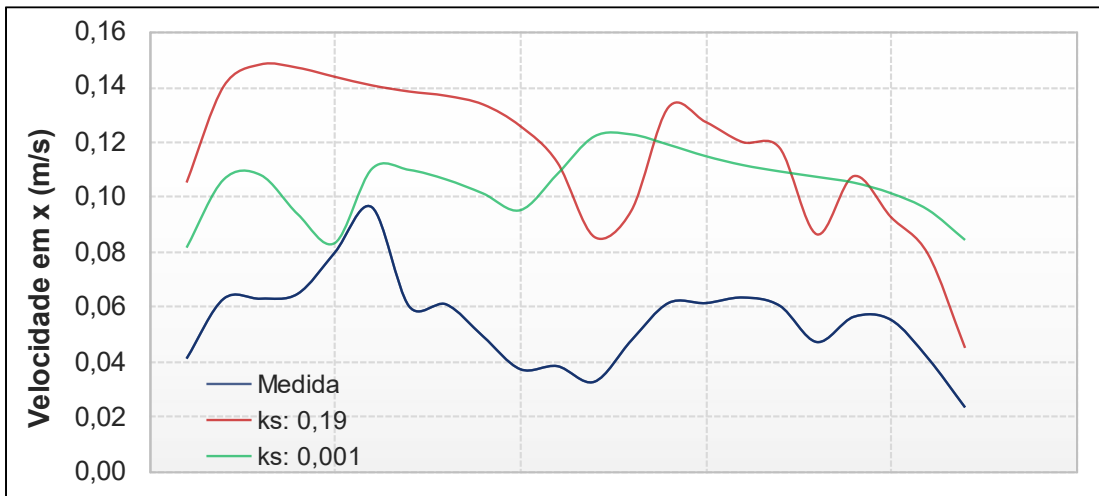
Ponto	Vx (m/s)		Diferença (%)	Vy (m/s)		Diferença (%)	Vmédia (m/s)		Diferença (%)
	Medida	Simulada		Medida	Simulada		Medida	Simulada	
1	0,041	0,082	50%	0,021	0,032	35%	0,046	0,088	48%
2	0,063	0,106	41%	0,025	0,036	29%	0,068	0,112	39%
3	0,063	0,108	42%	0,024	0,035	33%	0,068	0,114	41%
4	0,065	0,094	31%	0,025	0,037	33%	0,069	0,101	31%
5	0,080	0,083	4%	0,023	0,038	38%	0,083	0,092	9%
6	0,097	0,110	12%	0,027	0,035	24%	0,100	0,116	13%
7	0,060	0,110	45%	0,027	0,037	27%	0,066	0,116	43%
8	0,061	0,106	43%	0,023	0,038	40%	0,065	0,113	42%
9	0,049	0,101	51%	0,020	0,038	48%	0,053	0,108	51%
10	0,037	0,095	61%	0,015	0,039	62%	0,040	0,103	61%
11	0,038	0,108	65%	0,011	0,032	66%	0,040	0,113	65%
12	0,033	0,122	73%	0,011	0,036	70%	0,035	0,127	73%
13	0,048	0,123	61%	0,013	0,037	66%	0,050	0,128	61%
14	0,061	0,119	48%	0,008	0,037	78%	0,062	0,125	50%
15	0,061	0,115	47%	0,008	0,037	77%	0,062	0,121	49%
16	0,064	0,112	43%	0,004	0,037	89%	0,064	0,118	46%
17	0,060	0,109	45%	0,009	0,037	75%	0,061	0,116	47%
18	0,047	0,107	56%	0,018	0,037	51%	0,051	0,114	55%
19	0,056	0,105	46%	0,025	0,036	31%	0,062	0,111	45%
20	0,055	0,101	46%	0,020	0,035	43%	0,059	0,107	45%
21	0,041	0,096	57%	0,019	0,034	45%	0,045	0,101	55%
22	0,023	0,085	73%	0,010	0,032	69%	0,025	0,090	72%
		Mínimo	4%		Mínimo	24%		Mínimo	9%
		Máximo	73%		Máximo	89%		Máximo	73%
		Média	47%		Média	51%		Média	47%

Fonte: Autor (2024).

Para este cenário de simulação verifica-se que os resultados do modelo computacional superam em cerca de 9% a 73% os medidos, conforme Tabela 5.

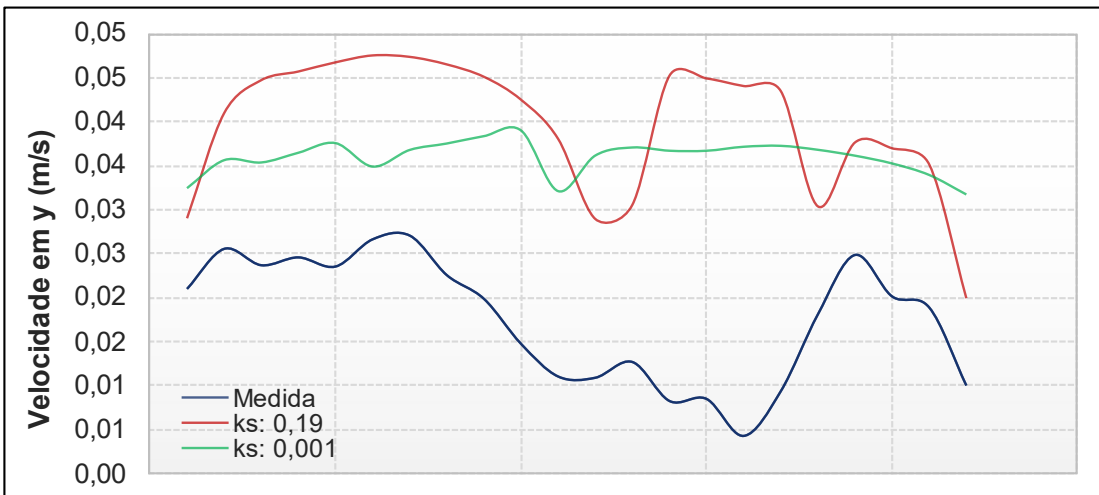
A Figura 50, Figura 51 e Figura 52 mostram a comparação das velocidades em x, y e velocidade média para ambos os cenários em análise.

Figura 50 – Comparação da velocidade na direção x



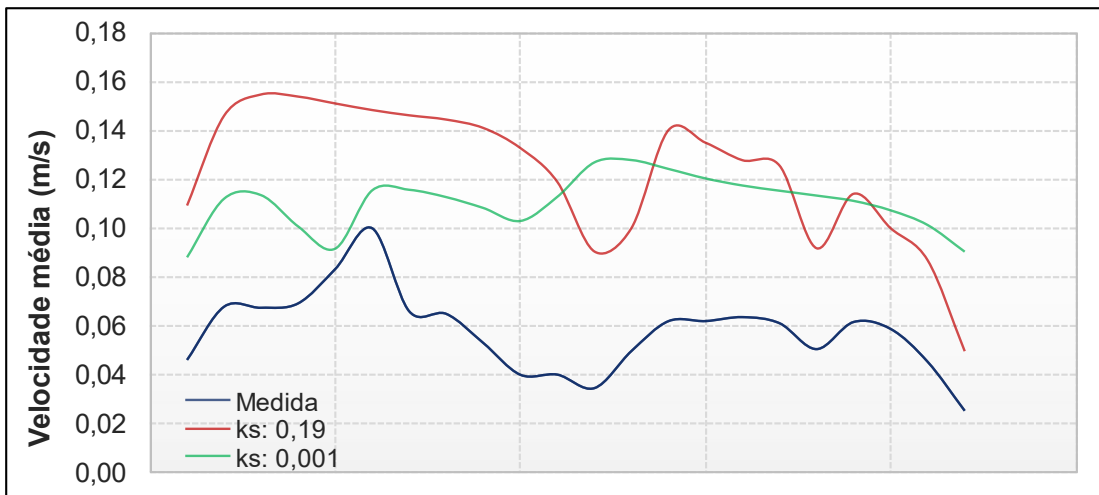
Fonte: Autor (2024).

Figura 51 – Comparação da velocidade na direção y



Fonte: Autor (2024).

Figura 52 – Comparação da velocidade média



Fonte: Autor (2024).

A partir da Figura 50, Figura 51 e da Figura 52, nota-se que os valores permanecem consistentemente acima dos medidos, apresentando uma tendência à estabilidade, com variações mais moderadas. Assim, conclui-se que alcançar uma calibração extremamente precisa do modelo é desafiador, e a altura de rugosidade está diretamente vinculada às flutuações de velocidade no modelo, exigindo avaliações específicas para cada caso.

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 baixas podem ter influenciado.

6.4 Transporte de sedimentos no reservatório – Cenário 3

6.4.1 Configuração do modelo

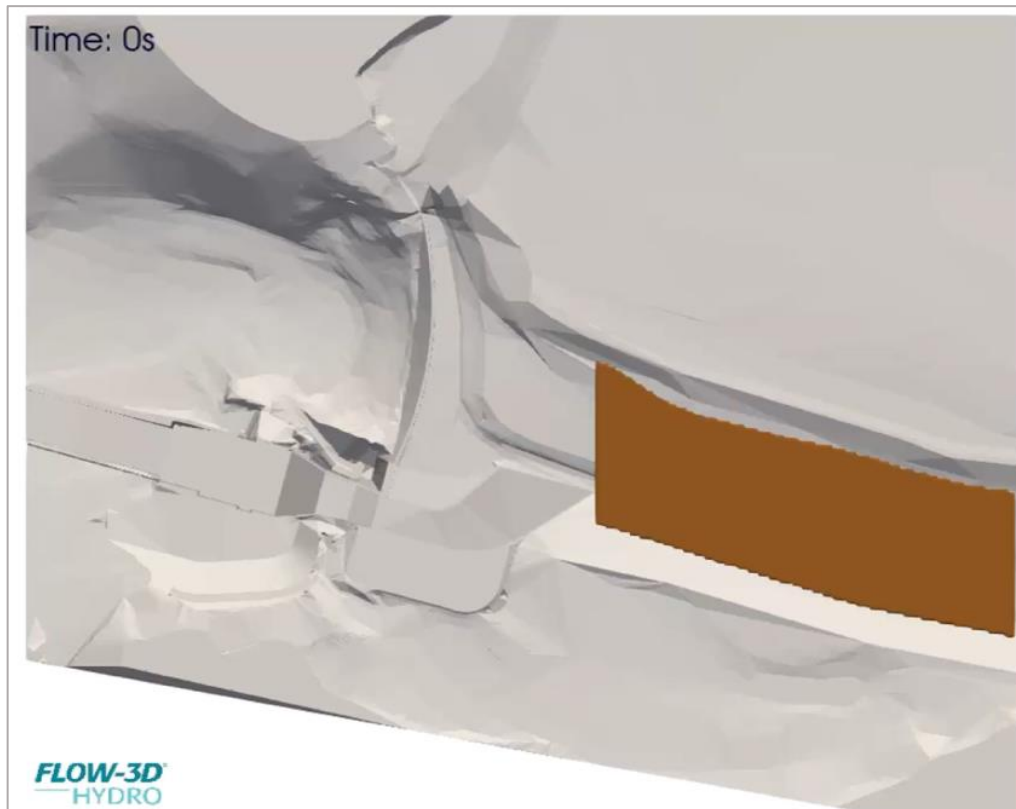
A simulação de transporte de sedimentos foi conduzida com uma vazão constante de 50,5 m³/h, utilizando uma altura de rugosidade K_s igual a 0,19 ($n = 0,040$), ao longo de 3600 segundos (1 hora). Este procedimento replicou as condições experimentais do trabalho de Campos (2018) para estabelecer a configuração de uma praia estável de sedimentos. Para tanto, foi criado um componente de geometria usado para criar regiões iniciais de sedimentos compactados (*Packed Sediment*) com um volume de 300 litros, Figura 53, replicando o volume de borracha previamente disposto no modelo reduzido experimental antes da formação da praia pelo escoamento, como pode ser visto na Figura 54. Testes preliminares foram realizados antes da simulação oficial para garantir essa correspondência de volume.

No módulo de transporte de sedimentos do modelo FLOW-3D, foram incorporadas as características físicas da borracha, conforme determinadas experimentalmente no trabalho de Campello (2017). Essas características incluem uma granulometria de

2,00 e 3,00 mm, considerando 50% de cada fração, um Parâmetro de Shields de 0,035, ângulo de repouso de 36° e massa específica de 1.140 kg/m^3 .

Não foi considerada a entrada adicional de sedimentos suspensos, visando representar as condições experimentais. Para o cálculo da descarga sólida, foi adotada a equação de Meyer Petter & Muller (1948).

Figura 53 – Componente de geometria para representação dos sedimentos compactados



Fonte: Autor (2024).

Figura 54 – Borracha disposta no modelo hidráulico reduzido previamente ao escoamento

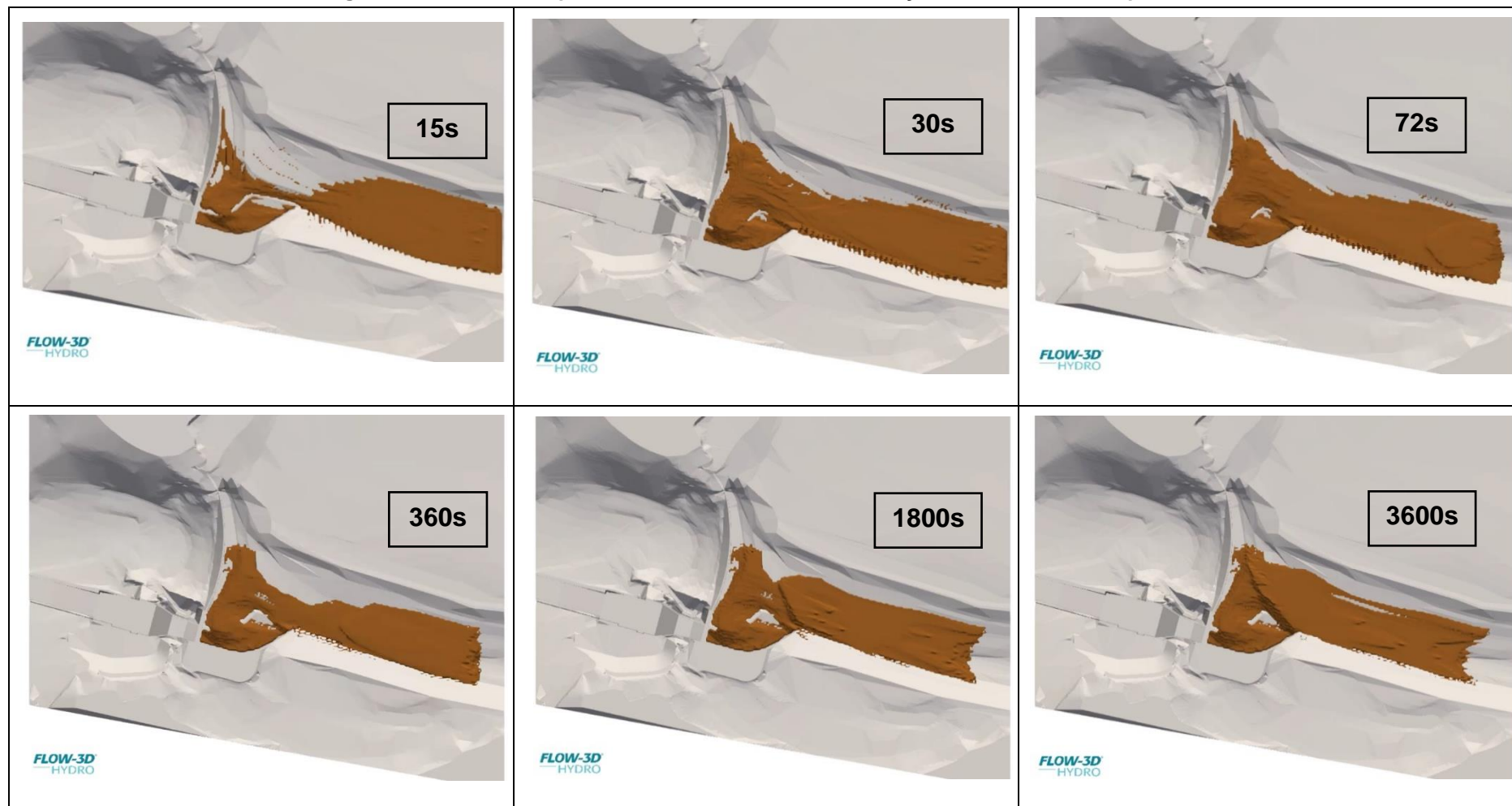


Fonte: Campos (2018).

6.4.2 Resultados da simulação de transporte de sedimentos

A Figura 55 apresenta intervalos temporais dos resultados da simulação de transporte de sedimentos, especificamente quanto à movimentação do sedimento compactado.

Figura 55 – Recorte temporal dos resultados da movimentação do sedimento compactado



Fonte: Autor (2024).

Pela Figura 53 é possível observar 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. Observa-se de maneira mais evidente (a partir de 360s) outra região vazia sendo formada 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 do componente sólido verificado a partir da estabilização do modelo 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.

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 56.

Figura 56 – Geometria de praia obtida ao final da simulação no modelo hidráulico reduzido



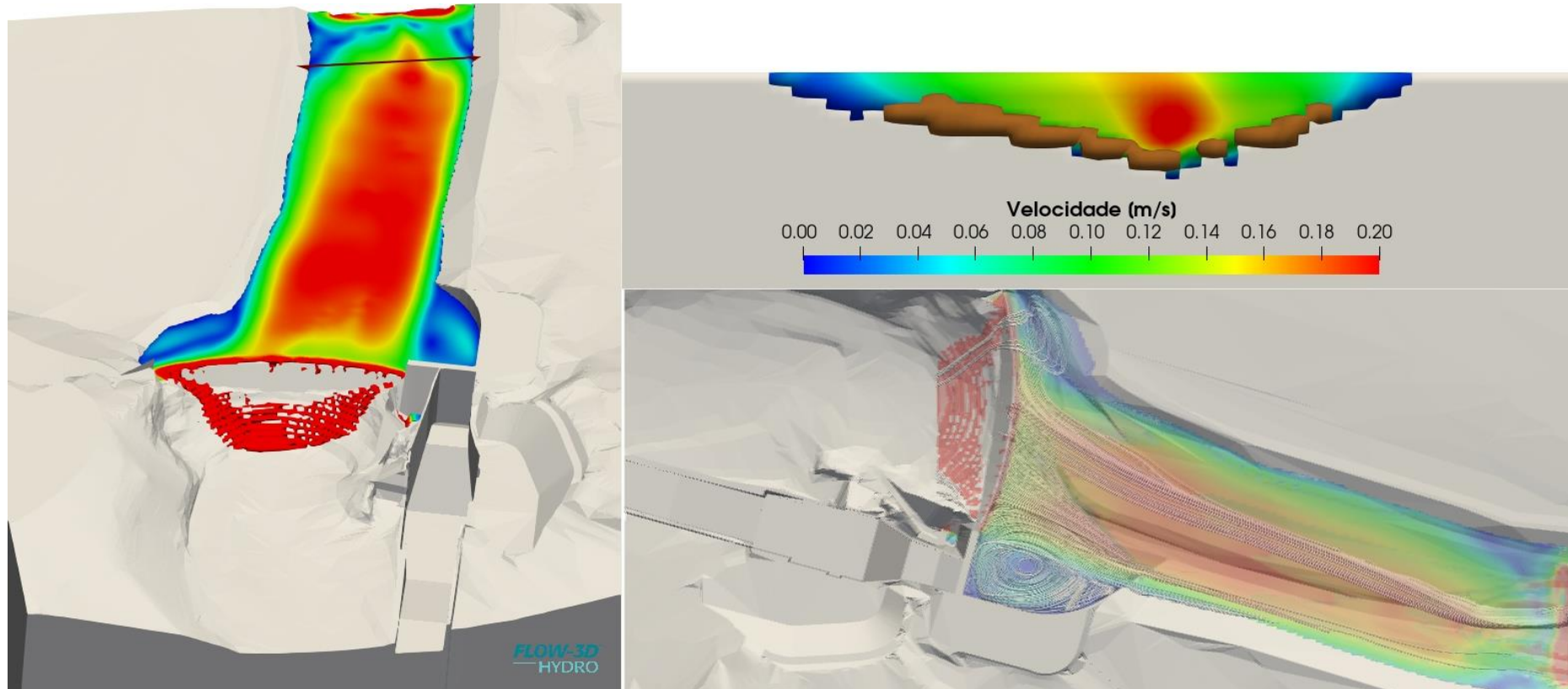
Fonte: Campos (2018).

De maneira geral, o resultado simulado se aproxima do obtido no modelo experimental. 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.

Na sequência, são verificados os resultados do padrão de escoamento ao final dos 3600 segundos de simulação. Devido à representação dos sedimentos compactados ocorrer por meio de um componente sólido, conforme mencionado anteriormente, os resultados nas seções do modelo que consideram esse componente são distintos daqueles obtidos nas simulações com o reservatório limpo. Observa-se que a resolução da visualização é mais rudimentar, devido à necessidade de ajustes para representar tanto o fluido quanto os sedimentos, o que representa uma limitação intrínseca do *software*.

A Figura 57 exibe o resultado de velocidade (m/s), para a condição de reservatório assoreado.

Figura 57 – Padrão de velocidade obtido ao final da simulação de transporte de sedimentos

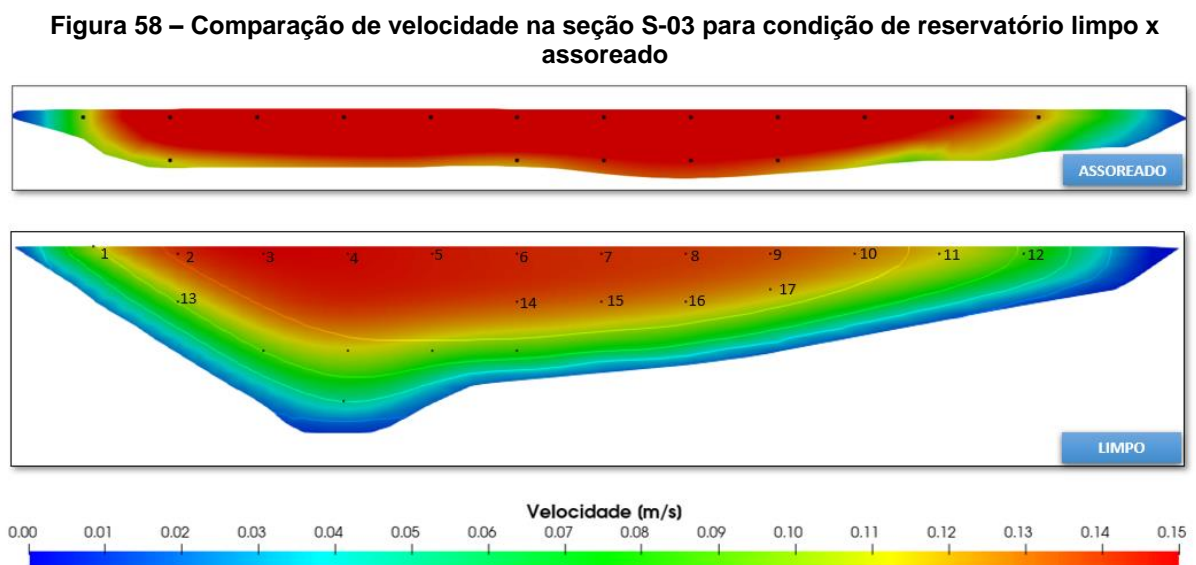


Fonte: Autor (2024).

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. No item 6.3.1, foram apresentadas as velocidades interpoladas nesta seção, sob condição de reservatório limpo, onde foi observada uma região central com velocidades mais altas, também se aproximando de uma forma circular, porém mais próxima à superfície. Não é possível afirmar uma correlação entre esses resultados, contudo, surge a hipótese de que durante a realização das condições simuladas no experimento, pode ter havido uma interferência na entrada do reservatório, que anteriormente estava vazio. Devido ao aumento repentino de velocidade, podem ter ocorrido turbulências, e as velocidades medidas nesta seção ainda não estavam estabilizadas.

Foi realizada uma comparação numérica das velocidades na seção S-03, conforme mostrado na Figura 58. Para esta análise comparativa, a seção retirada do modelo foi obtida para o fluido, portanto, não é possível verificar a presença dos sólidos nesta visualização.



Fonte: Autor (2024).

As velocidades foram obtidas para os pontos na seção S-03 em ambos os cenários de simulação, com localização aproximada, conforme ilustrado na Figura 59. Os resultados correspondentes podem ser verificados na Tabela 6.

Tabela 6 – Comparação das velocidades entre reservatório limpo e assoreado

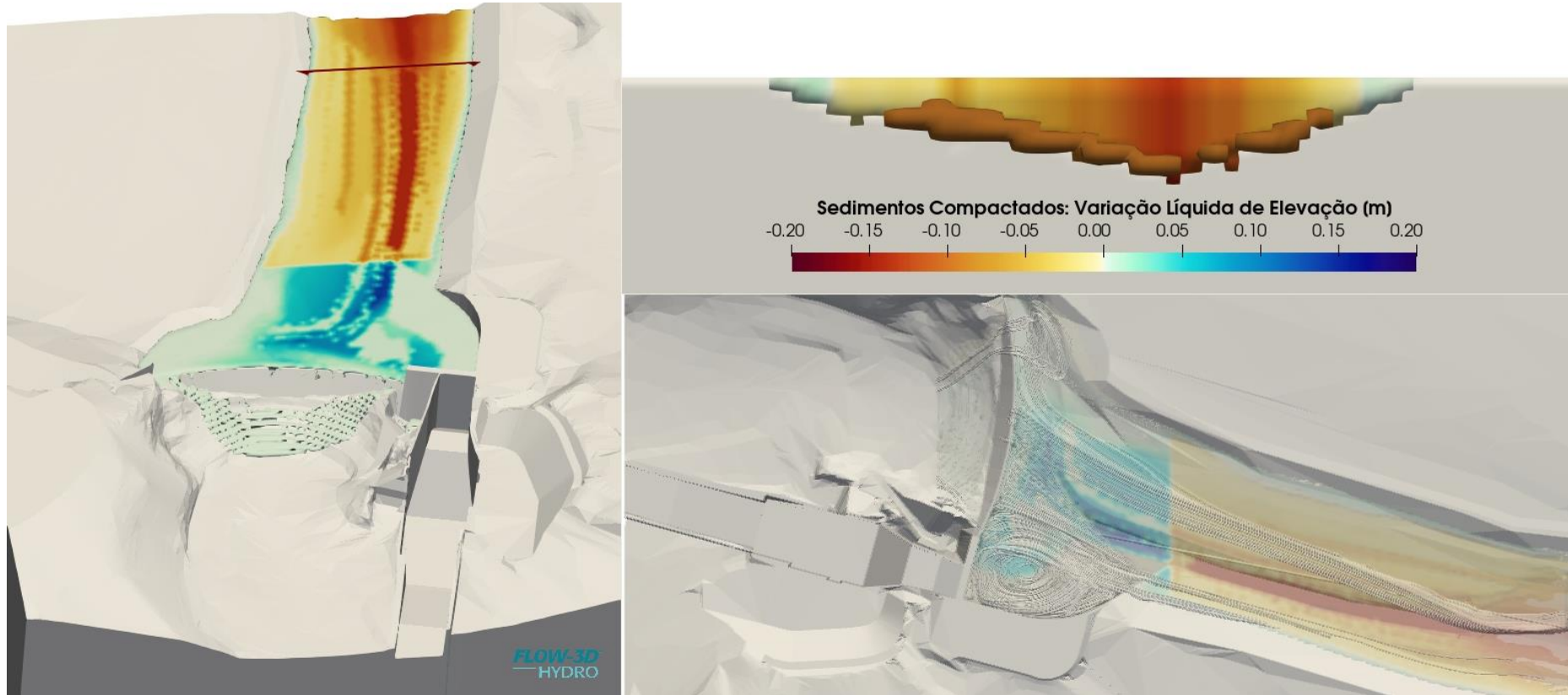
Ponto	Vx (m/s)		Diferença (%)	Vy (m/s)		Diferença (%)	Vmédia (m/s)		Diferença (%)
	Limpo	Assoreado		Limpo	Assoreado		Limpo	Assoreado	
1	0,11	0,11	4%	0,03	0,04	20%	0,11	0,12	5%
2	0,14	0,12	-15%	0,04	0,04	-1%	0,15	0,13	-13%
3	0,15	0,14	-8%	0,04	0,05	2%	0,15	0,15	-7%
4	0,15	0,14	-5%	0,05	0,06	18%	0,15	0,15	-2%
5	0,14	0,13	-12%	0,05	0,06	18%	0,15	0,14	-7%
6	0,14	0,10	-43%	0,05	0,03	-81%	0,15	0,10	-46%
7	0,14	0,17	20%	0,05	0,05	8%	0,15	0,18	19%
8	0,14	0,19	27%	0,05	0,06	19%	0,14	0,20	27%
9	0,13	0,19	30%	0,05	0,06	23%	0,14	0,20	30%
10	0,13	0,19	34%	0,04	0,06	29%	0,13	0,20	34%
11	0,11	0,18	39%	0,04	0,06	38%	0,12	0,19	39%
12	0,09	0,18	53%	0,03	0,06	54%	0,09	0,19	53%
13	0,10	0,18	47%	0,03	0,07	55%	0,10	0,19	48%
14	0,13	0,18	24%	0,05	0,07	37%	0,14	0,19	26%
15	0,13	0,17	23%	0,04	0,07	35%	0,14	0,18	25%
16	0,12	0,14	16%	0,04	0,06	28%	0,13	0,16	17%
17	0,12	0,11	-6%	0,04	0,05	13%	0,13	0,12	-3%
		Mínimo	-43%		Mínimo	-81%		Mínimo	-46%
		Máximo	53%		Máximo	55%		Máximo	53%
		Média	14%		Média	19%		Média	14%

Fonte: Autor (2024).

Como observado na Tabela 6, o padrão das velocidades para a condição de reservatório assoreado foi alterado. Em relação a velocidade média, estas são superiores às velocidades para a condição de reservatório limpo, variando de 17% a 53%, porém são inferiores em outras regiões, com variação de -3% a -46%.

Na Figura 59, é apresentado o resultado contendo a "variação líquida de elevação", que se refere à diferença de elevação entre dois pontos.

Figura 59 – Padrão de mudança da variação líquida de elevação obtido ao final da simulação de transporte de sedimentos

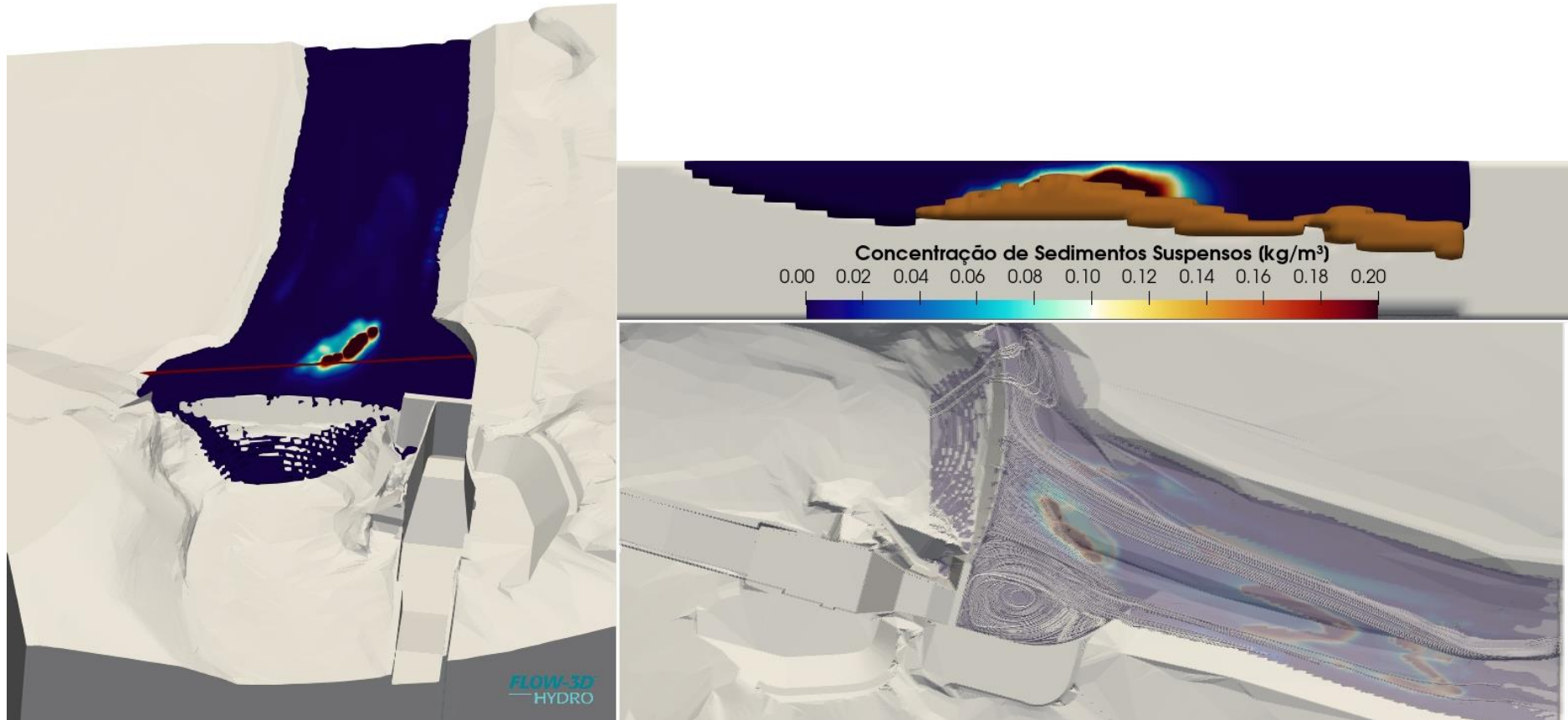


Fonte: Autor (2024).

A área delimitada pelo componente sólido introduzido no modelo, formado pelos sedimentos compactados no início da simulação (tempo = 0 segundos), é perceptível. Nessa região, a alteração líquida de elevação corresponde à diferença entre o nível da água e o fundo do fluido, isto é, a superfície de contato do fluido com o componente sólido. No entanto, na área que exclui esse componente, notada pelas tonalidades azuis, essa diferença é em relação ao fundo do reservatório. Quando o resultado dessa variação é positivo, sugere um aumento na elevação, evidenciado por tons de azul na representação gráfica, indicando possíveis depósitos de sedimentos; em contraste, se for negativo, aponta para um indício de erosão, representado por tonalidades em marrom.

A partir da Figura 60, se observam os resultados relativos aos sedimentos em suspensão ao final da simulação.

Figura 60 – Padrão de concentração de sedimentos suspensos obtido ao final da simulação de transporte de sedimentos

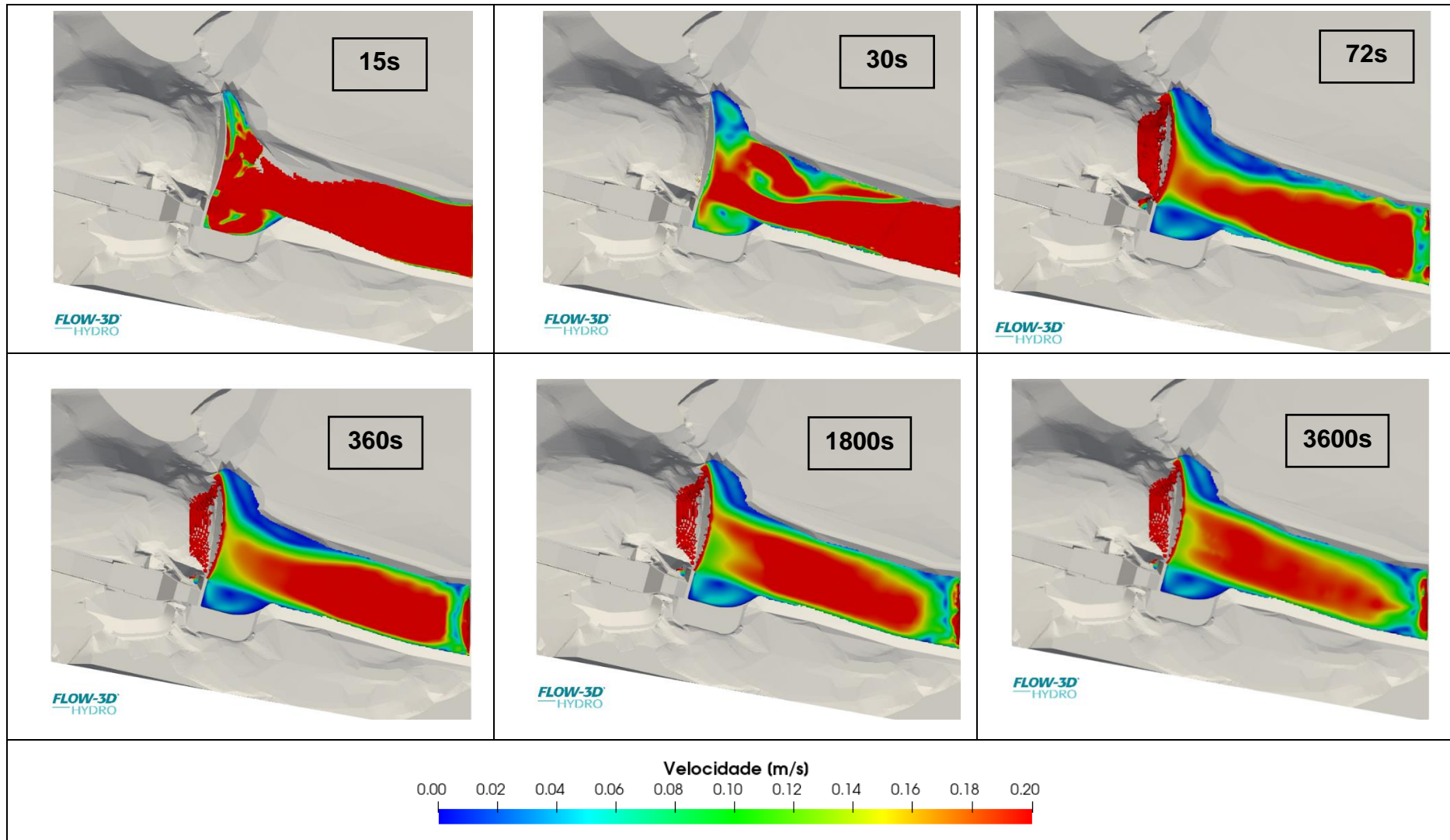


Fonte: Autor (2024).

Nesse caso, uma entrada direta de sedimentos suspensos não foi incorporada, o que indica que esses resultados estão relacionados à ressuspensão do sedimento presente no fundo. Dessa forma, a suspensão dos sedimentos ocorre à medida que o material do fundo se desloca, acompanhando o movimento da água. A ressuspensão, por sua vez, acontece principalmente no ponto de contato do fluido com o componente sólido formado pelos sedimentos.

Para melhor compreensão, também foram gerados recortes no tempo para esses resultados nas Figura 61 a Figura 63, sendo a Figura 61 relativa às velocidade obtidas.

Figura 61 – Recorte temporal dos resultados da velocidade

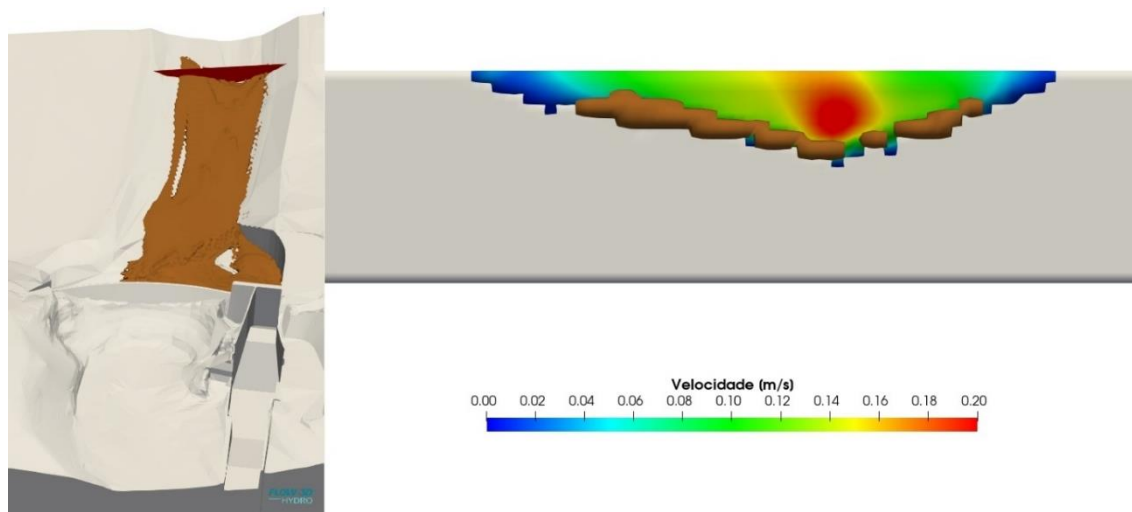


Fonte: Autor (2024).

Conforme o reservatório enche, na Figura 61, até aproximadamente 30 segundos de simulação, são notadas as variações de velocidade que sofrem interferência direta dos sedimentos compactados. A partir dos 72 segundos mostrados na figura, as velocidades tendem à estabilização no reservatório, sofrendo pequenas alterações. O resultado final, 3600 segundos, é semelhante àquele obtido na condição de reservatório limpo, apesar das diferenças observadas, conforme Tabela 6, além da diferença no início do reservatório, explicitado anteriormente.

A partir da Figura 62 a Figura 67 são apresentados os resultados de velocidade nas seções na condição de reservatório assoreado (Cenário 3), onde é possível observar também o padrão de deposição dos sedimentos nas seções.

Figura 62 – Resultados de velocidade na seção S-01 – Cenário 3 – Vazão 50,5m³/h

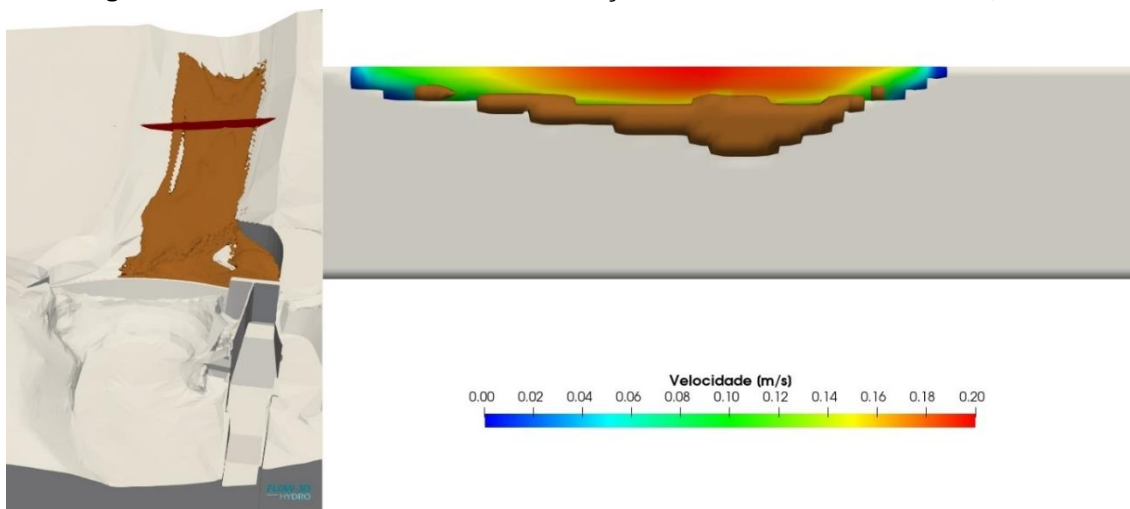


Fonte: Autor (2024).

Pela Figura 62 pode ser observado valores de velocidades maiores na região central, como esperado, se tornando um local de maior capacidade de arrasto de material.

A Figura 63 mostra os resultados de velocidades da seção 2 para o cenário de transporte de sedimentos com a vazão de 50,5 m³/h.

Figura 63 – Resultados de velocidade na seção S-02 – Cenário 3 – Vazão 50,5m³/h

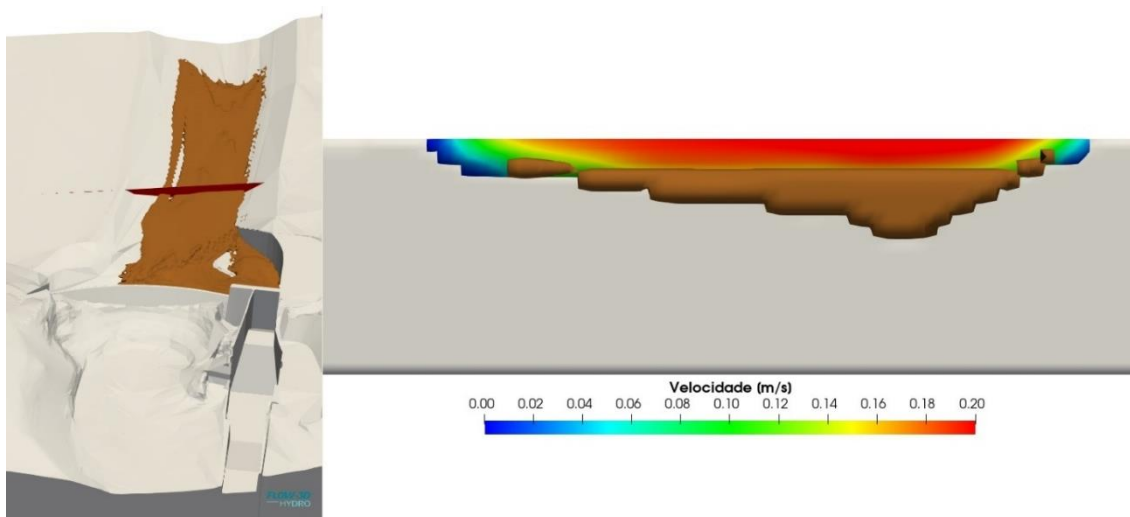


Fonte: Autor (2024).

Pela Figura 63 verifica-se um acúmulo maior de sedimento na seção central, caracterizando o acúmulo de sedimentos arrastados na região de maiores velocidades. Além disso, a região de maior velocidade se amplia tornando maior a região de arrasto de material.

A Figura 64 mostra os resultados de velocidades da seção S-03 para o cenário de transporte de sedimentos com a vazão de 50,5 m³/h.

Figura 64 – Resultados de velocidade na seção S-03 – Cenário 3 – Vazão 50,5m³/h

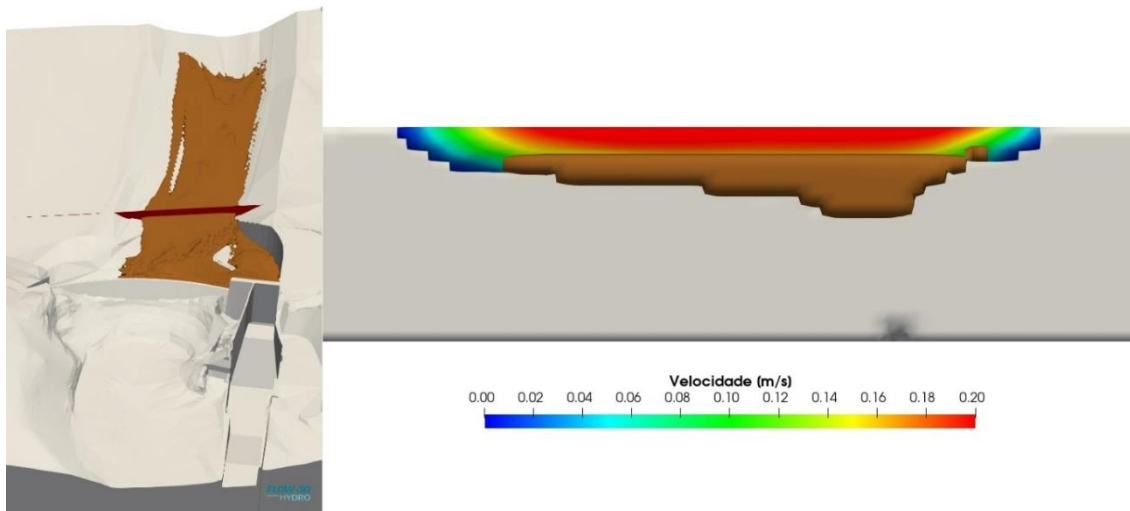


Fonte: Autor (2024).

Pela Figura 64 verifica-se um acúmulo maior ainda de sedimento na seção central. Além disso, a região de maior velocidade fica mais confinada na parte superior do escoamento.

A Figura 65 mostra os resultados de velocidades da seção 4 para o cenário de transporte de sedimentos com a vazão de 50,5 m³/h.

Figura 65 – Resultados de velocidade na seção S-04 – Cenário 3 – Vazão 50,5m³/h

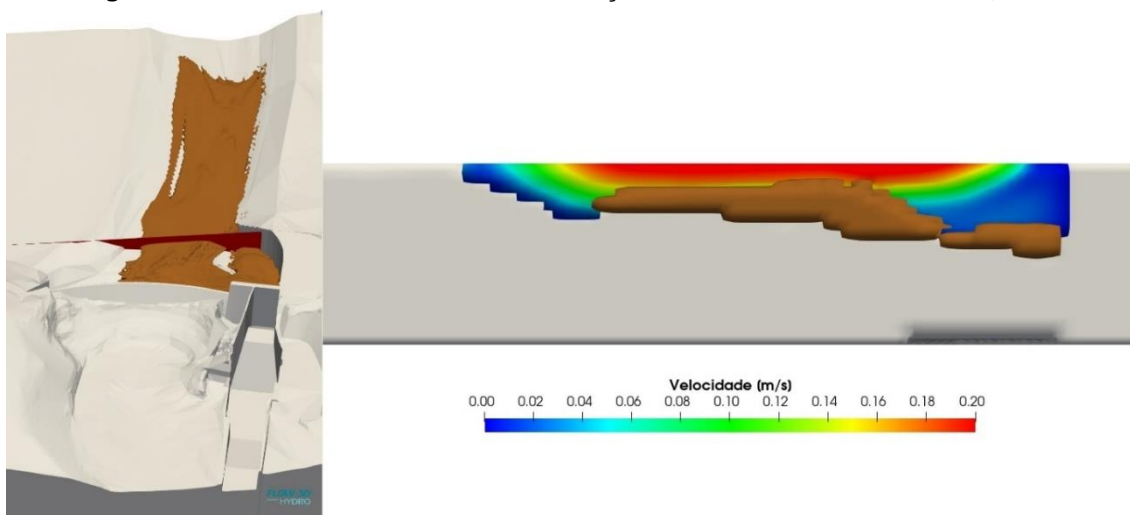


Fonte: Autor (2024).

Pela Figura 65 verifica-se um comportamento muito parecido com a seção anterior.

A Figura 66 mostra os resultados de velocidades da seção 5 para o cenário de transporte de sedimentos com a vazão de 50,5 m³/h.

Figura 66 – Resultados de velocidade na seção S-05 – Cenário 3 – Vazão 50,5m³/h

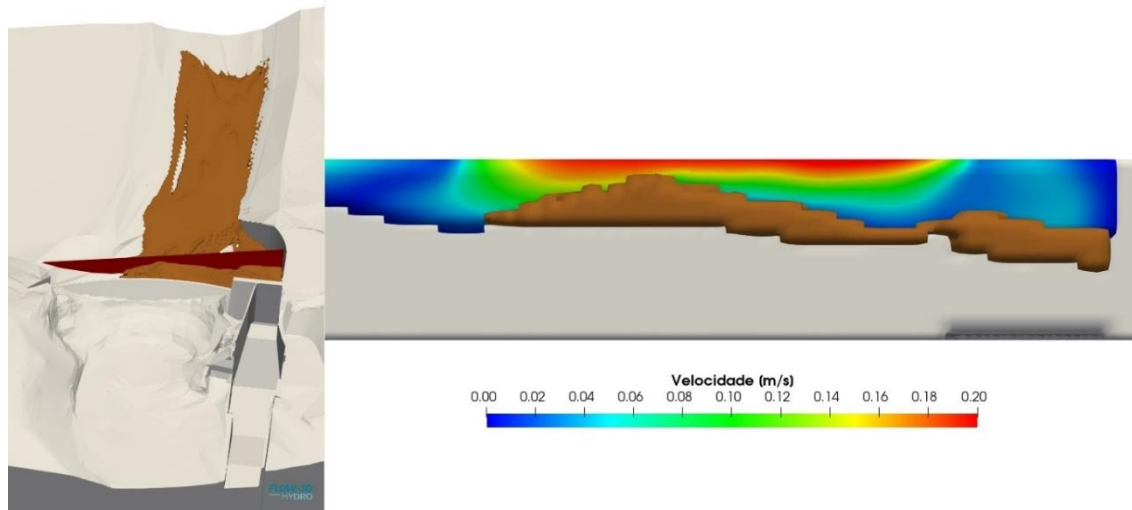


Fonte: Autor (2024).

Pela Figura 66 observa-se um acúmulo de sedimento na parte da direita, pois se aproxima da região do vertedor e na entrada do canal de adução das máquinas a direita.

A Figura 67 mostra os resultados de velocidades da seção 6 para o cenário de transporte de sedimentos com a vazão de 50,5 m³/h.

Figura 67 – Resultados de velocidade na seção S-06 – Cenário 3 – Vazão 50,5m³/h



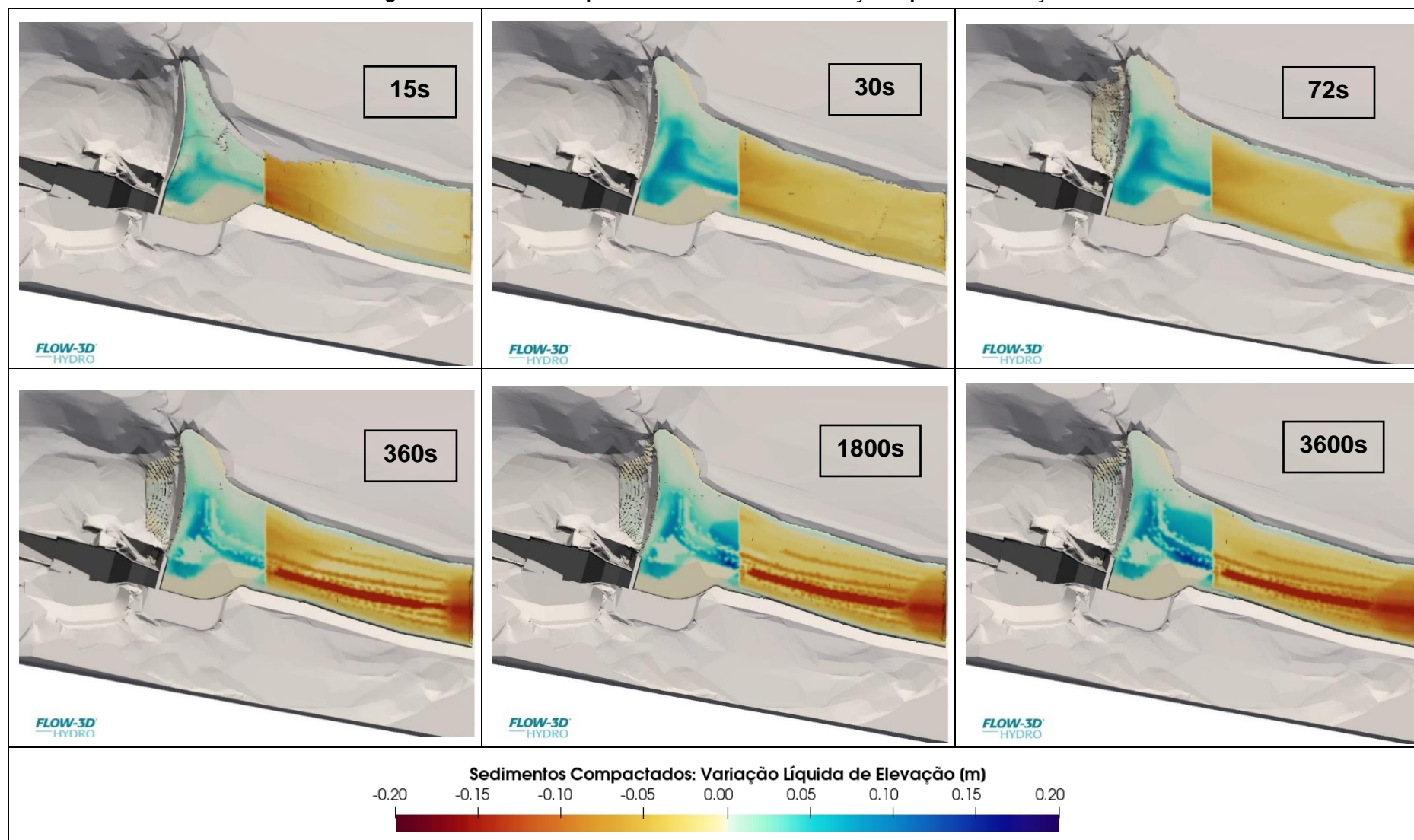
Fonte: Autor (2024).

A seção 6 (Figura 67) mostra um grande acúmulo de sedimentos na região anterior ao vertedor e no canal de adução. Esse fenômeno foi observado também nos testes no modelo reduzido.

A validação do padrão de deposição dos sedimentos nas seções dependeria da realização de levantamentos topográficos nessas condições, porém, esse trabalho não foi realizado.

A Figura 68 apresenta recorte temporal contendo os resultados de variação líquida da elevação.

Figura 68 – Recorte temporal dos resultados da variação líquida de elevação

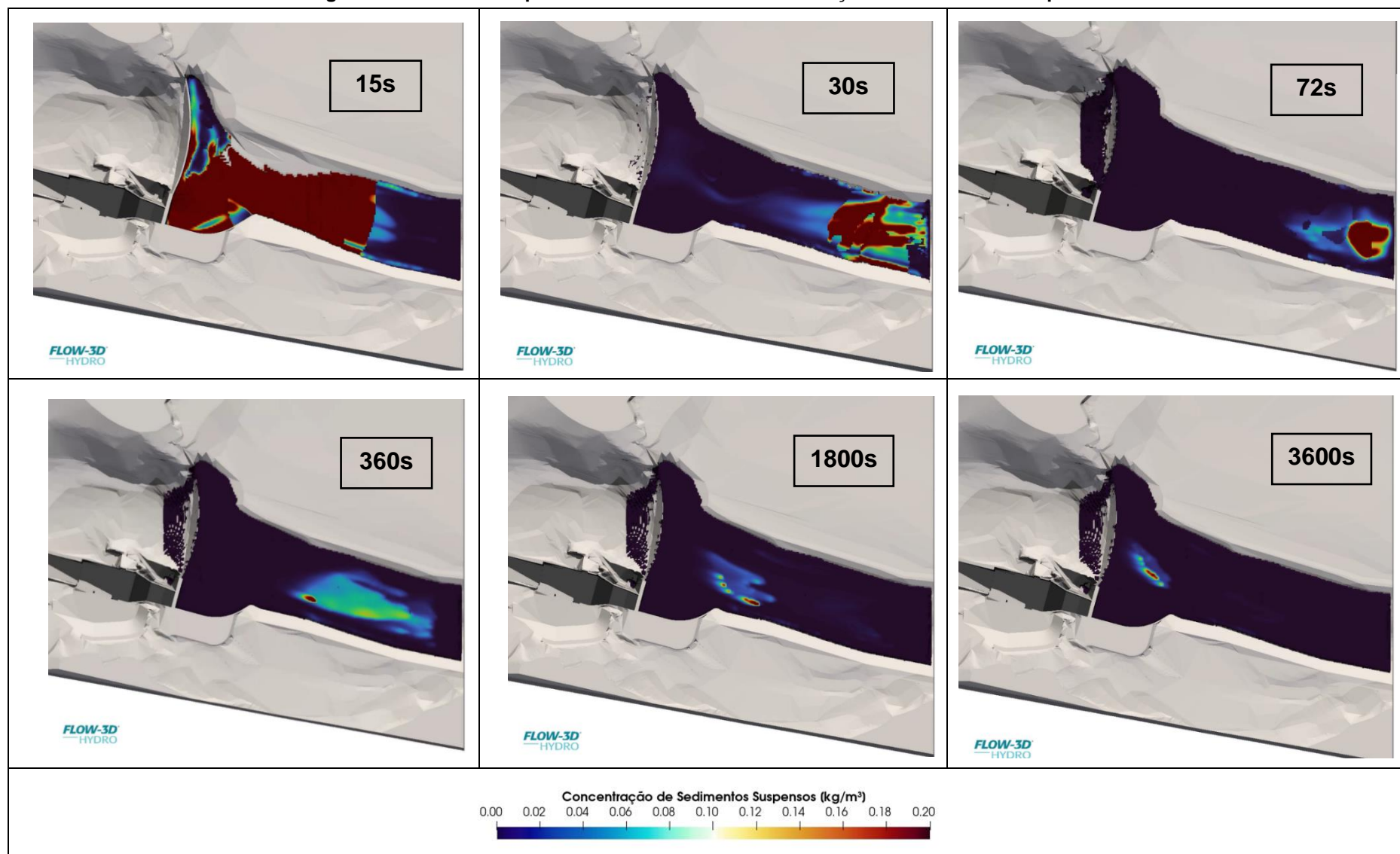


Fonte: Autor (2024).

A partir de 360 segundos ocorre uma erosão mais expressiva no fundo do reservatório, em relação à região onde são verificados os sedimentos compactados. Ou seja, os sólidos tendem a se deslocar mais intensamente nessa região, se depositando a jusante, na direção do escoamento. Além disso, na entrada do reservatório também ocorre uma movimentação mais intensa desses sedimentos, ocasionando em uma região de erosão.

A Figura 69 apresenta recorte temporal contendo os resultados de sedimentos em suspensão.

Figura 69 – Recorte temporal dos resultados da concentração de sedimentos suspensos



Fonte: Autor (2024).

Nota-se que a suspensão dos sedimentos ocorre à medida que o fluido se desloca, transportando os sedimentos compactados. Quando o modelo atinge um estado mais estável, ao final da simulação, a presença de sedimentos em suspensão torna-se pouco notável, já que não são mais verificadas grandes flutuações de velocidade.

7 CONCLUSÕES

A partir das simulações desenvolvidas no *software* FLOW-3D, considerando o reservatório limpo e vazão de 50,5 m³/h (Cenário 1), foi possível obter uma curva de descarga bastante próxima àquela medida no modelo reduzido. Foram analisadas alturas de rugosidade (K_s) de 0,010; 0,024; 0,080 e 0,190.

Os resultados que melhor se aproximaram da curva de descarga medida no modelo reduzido foram aqueles submetidos a $K_s = 0,19$. As métricas de erro calculadas indicaram valores finais mais baixos: MAE = 0,0045, MSE = 0,000031, RMSE = 0,0056 e MAPE (%) = 0,0027. Assim, conforme as profundidades do fluxo observadas, variando de 0,12 a 0,28 m, o valor médio de Manning corresponde a aproximadamente 0,040. Este valor é tipicamente associado a revestimentos de alvenaria de pedras, revestimento com vegetação baixa ou enrocamento de cascalho.

No que tange ao padrão do escoamento nas simulações do Cenário 1, foi observada 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. Na área central, por outro lado, foram notadas velocidades mais altas, sugerindo uma propensão à formação de zonas de erosão.

No Cenário 2 (275 m³/h), como esperado, a área ocupada pelo fluido foi maior, porém, ainda foi perceptível a formação de vórtices no canal de aproximação.

Ao analisar as velocidades nas diferentes seções e compará-las com as seções de velocidade provenientes da interpolação das velocidades medidas no modelo físico reduzido, foram observadas algumas divergências. As velocidades simuladas no modelo CFD superaram as medidas na maioria dos casos, além de serem obtidas em módulo. Também foram observadas diferenças na distribuição das velocidades nas seções medidas, comparadas às simuladas, sugerindo limitações da interpolação a

partir de medições pontuais ou possíveis interferências no fundo do reservatório, como a ocorrência de turbulência. No entanto, não se pode afirmar que a modelagem física teve maior peso em relação as discrepâncias de velocidade observadas.

Nas seções medidas, localizadas no canal de aproximação, foram observadas velocidades extremamente baixas e/ou nulas nessa região, indicando possível contrafluxo. Já nas seções simuladas, foram observadas velocidades nulas; no entanto, não foram obtidas velocidades negativas, já que são obtidas em módulo, apesar de ter sido observada a formação de vórtices nessa região na visualização em planta.

Foi realizada uma estimativa para comparação numérica dos valores de velocidade medidos em comparação com os simulados para a seção S-03. Com relação à velocidade média obtida, foi possível observar que resultados do modelo computacional superam de 33% a 70% os valores medidos.

Com base nisso, foram realizadas novas simulações, variando o valor da altura de rugosidade na tentativa de recalibrar o modelo para obter velocidades mais próximas dos valores medidos na curva de descarga. Para o resultado da simulação com uma altura de rugosidade de $K_s = 0,001$, observou-se que o nível da água se aproxima mais do valor medido para a vazão de 50,5 m³/h (Cenário 1), sendo o valor de Manning correspondente a aproximadamente 0,012, associado a revestimento liso. Ao simular uma vazão superior no Cenário 2 (275 m³/h), o resultado do nível do reservatório pelo modelo se distancia mais do valor medido nessas circunstâncias. Além disso, verificou-se que os resultados do modelo computacional superam em cerca de 9% a 73% os valores medidos, em comparação das velocidades em x, y e velocidade média para ambos os cenários em análise.

Assim, conclui-se que alcançar uma calibração extremamente precisa do modelo é desafiador, e a altura de rugosidade está diretamente vinculada às flutuações de velocidade no modelo, exigindo avaliações específicas para cada caso. O modelo CFD em questão tende a superestimar as velocidades, o que pode não refletir com precisão a realidade, devido às imprecisões do modelo simulado e às limitações das medições de velocidade. Isso ressalta a importância contínua da realização de

monitoramentos para uma compreensão mais fiel e ajustada das condições, correlacionando-as com simulações em diferentes cenários e testes.

A validação de modelos numéricos depende de medições de velocidade realizadas em um modelo reduzido ou no próprio protótipo. Contudo, é importante considerar os erros inerentes às medições, decorrentes de flutuações no equipamento utilizado, erros do observador, aleatoriedades, entre outros. Dessa forma, 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.

A avaliação da topografia é um fator fundamental para a análise das condições do escoamento, sendo determinante na distribuição da velocidade e direção do escoamento. Contudo, é necessário considerar uma aproximação relativa à altura de rugosidade, que abrange não somente a superfície do leito, mas também as paredes do canal. Este parâmetro foi crucial para a calibração dos modelos hidráulicos em estudo, uma vez que sua alteração implica em diferentes padrões de escoamento. Ainda assim, assumir a mesma altura de rugosidade para todas as condições de vazões simuladas, bem como para todo o reservatório, implica em enfrentar limitações.

A simulação de transporte de sedimentos foi conduzida com uma vazão constante de 50,5 m³/h, utilizando uma altura de rugosidade $K_s = 0,19$, 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. Foram incorporadas as características físicas da borracha, conforme determinadas experimentalmente no trabalho de Campello (2017). Essas características incluem uma granulometria de 2,00 e 3,00 mm, considerando 50% de cada fração, um Parâmetro de Shields de 0,035, ângulo de repouso de 36° e massa específica de 1.140 kg/m³. Não foi considerada a entrada adicional de sedimentos suspensos,

visando representar as condições experimentais. Para o cálculo da descarga sólida, foi adotada a equação de Meyer Petter & Muller (1948).

Foi possível observar uma rápida movimentação do sedimento em direção ao canal de aproximação e na parte inferior do vertedouro, sendo esse espaço quase completamente preenchido com sedimento. A massa de sedimento na entrada do reservatório se deslocou em direção ao barramento, formando uma região vazia nesse trecho inicial do reservatório e outra região vazia 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 do componente sólido verificado a partir da estabilização do modelo 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.

Foi possível identificar zonas mais propensas à erosão na entrada do reservatório e na região central, onde as velocidades são mais altas, propiciando maior arraste do material, e as zonas de deposição, próximas ao barramento, para onde a massa de sedimentos se deslocou.

Pelo fato de não ter sido incorporada a entrada de sedimentos suspensos, os resultados referentes à concentração de sedimentos suspensos estão relacionados à ressuspensão do sedimento presente no fundo. Este processo ocorre à medida que o material do fundo se desloca, acompanhando o movimento da água, e acontece principalmente no ponto de contato do fluido com o componente sólido formado pelos sedimentos.

Apesar da necessidade de aprimoramentos no modelo computacional e de análises mais aprofundadas para validação numérica, foi possível constatar que o modelo numérico tridimensional da PCH Salto Paraopeba demonstrou eficiência na reprodução das condições de transporte de sedimentos observadas no modelo experimental. O modelo foi capaz de replicar condições semelhantes às observadas, mesmo diante das divergências notadas nas velocidades durante os cenários de calibração considerando o reservatório limpo.

O fato de a praia formada ao final da simulação assemelhar-se àquela obtida no modelo reduzido, corrobora para a validade do uso da equação de Meyer, Peter e Muller (1948) no cálculo do transporte de sedimentos por arrasto, considerando a borracha na representação do sedimento. Além disso, os resultados do modelo numérico, ao se aproximarem dos resultados observados no experimento, evidenciam a consistência da caracterização da borracha desenvolvida por Campello (2017). Adicionalmente, foi possível identificar no modelo numérico as regiões no reservatório mais propensas à deposição e à erosão, compatíveis, de maneira geral, com as observações feitas no modelo experimental.

A concepção deste trabalho demonstrou a eficiência em se utilizar um modelo reduzido na validação do modelo numérico computacional, dada a impossibilidade da verificação direta com medidas no protótipo no âmbito do contexto do presente estudo, assim como algumas das limitações encontradas nesse tipo de estudo.

8 RECOMENDAÇÕES

O estudo atual prossegue uma série de pesquisas realizadas anteriormente desde a concepção do modelo hidráulico reduzido da PCH Salto Paraopeba, construído no laboratório do CPH-UFMG. No âmbito do trabalho de Campos (2018), além das medidas de velocidade no reservatório do modelo reduzido, foram conduzidas simulações bidimensionais. No presente estudo, foi possível avançar para simulações tridimensionais desse modelo. A viabilidade das simulações de transporte de sedimentos foi alcançada por meio da caracterização da borracha utilizada para representar o sedimento, conforme estabelecido no trabalho de Campello (2017).

Além desta pesquisa, é possível reconhecer a possibilidade da continuidade a estudos subsequentes para aprimorar as análises existentes e ampliar as perspectivas de investigação. Algumas sugestões incluem:

- Explorar diferentes modelos de turbulência na análise CFD e conduzir uma investigação mais aprofundada nesse tópico.
- Investigar outras equações de transporte do sedimento do fundo, como as equações de Van Rijn e Nielsen.

- Variar a altura de rugosidade no reservatório.
- Experimentar refinamentos adicionais na malha visando aumentar a precisão dos resultados, requerendo mais tempo e capacidade computacional, incluindo investimentos em *hardware* e licenças de *software* adequadas.
- Utilizar diferentes modelos CFD e, conseqüentemente, outros métodos de discretização das equações de Navier-Stokes para realizar comparações de precisão dos resultados, contemplando modelos como o OpenFOAM®, Autodesk®, Ansys Fluent®, Delft3D, entre outros.
- Conduzir um estudo focado na simulação CFD da abertura da comporta do modelo reduzido da PCH Salto Paraopeba, demandando novas medições e testes experimentais, bem como investimentos na manutenção do modelo.
- Realizar estudos semelhantes em outras estruturas, exigindo a implementação de novos modelos reduzidos e investimentos contínuos na manutenção e modernização do laboratório do Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG.
- Explorar temas aderentes, como o estudo dos impactos ambientais a jusante, vida útil e repotenciação, para uma compreensão abrangente do contexto.
- Integrar esses temas nas salas de aula do curso de Engenharia Ambiental e Engenharia Civil, reconhecendo a necessidade de aprimorar essas pesquisas diante do avanço da capacidade computacional.

REFERÊNCIAS

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

ALBARELLO, L. *Guia para implantação de pequenas centrais hidrelétricas- PCHs*. Dissertação de Mestrado. Trabalho de Conclusão de Curso de Especialista. Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos. UFSM, Panambi /RS, 2014.

AÑAZCO B. R, MALDONADO A. S, ESCANDÓN A. B. e GUERRERO X. S. Methodology to evaluate the repowering of small hydroelectric power plants: Case study El Amarillo in Portovelo, Ecuador. *2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ROPEC48299.2019.9057097.

ANDERSON, J. D. (2011) *Fundamentals of Aerodynamics*. New York: McGraw-Hill, 5ª edição.

ANEEL, *Resolução Normativa nº 1.070, de 29 de agosto de 2023*. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231070.html>>. Acesso em 13 de janeiro de 2024.

ANEEL, *SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL*. Disponível em: <<https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/?tags=Capacidade+Instalada>>. Acesso em 10 de maio de 2023.

BAPTISTA M. e LARA M. (2014) *Fundamentos da Engenharia Hidráulica*. Belo Horizonte: UFMG, 3ª edição.

BRIDGMAN, P. W. (1922) *Dimensional analysis*. New Haven: Yale University Press.

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.

Campos, R. 2001, *Three-Dimensional Reservoir Sedimentation Model*, Tese de Doutorado, University of Newcastle, Reino Unido.

CARVALHO, N. O., et al. *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*, ANEEL, Brasília, 2000.

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-do-paraopeba/>>. Acesso em 12 de maio de 2023.

CHAUDHRY, M. H. *Open-Channel Flow*, 2ed., Springer Science+Business Media, LLC, 2008.

CHOW, V. T. *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 1988.

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

DEY, S. (2014). *Fluvial Hydrodynamics and Sediment Transport Phenomena*, Springer, Berlin.

ELETROBRÁS. *Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas*. Diretoria de Engenharia, 2000.

ELETROBRÁS; Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH. *Diagnóstico das Condições sedimentológicas dos Principais Rios Brasileiros*. UFRGS, Rio de Janeiro, 1992.

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

FORTUNA, A. O. (2000). *Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos – Conceitos Básicos e Aplicações*. São Paulo – SP.

GONÇALVES, M. O. *Análise Comparativa Entre Modelo Reduzido e Modelos Computacionais Uni e Bidimensionais*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. UFRP, Curitiba/PR, 2017.

HILLEBRAND, G., KLASSEN, I., OLSEN, N. R. B. (2017). 3D CFD modelling of velocities and sediment transport in the Iffezheim hydropower reservoir. *Hydrology Research* 48 (1), pp. 147–159.

HAUN, S., KJÆRÅS, H., LØVFALL, S., OLSEN, N. R. B. Three-dimensional measurements and numerical modelling of suspended sediments in a hydropower reservoir. *J. Hydrol.* 2013, 479, 180–188.

HIRSCH, C. (2007). *Numerical Computation of Internal and External Flows. The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. 2. ed.

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

JULIEN, P. Y. (2010). *Erosion and sedimentation*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2nd edn.

JULIEN, P. Y. (2002) *River Mechanics*. 1ª ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

LANE, E. W. (1955). *The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering*. *ASCE Transactions*, 120(1), 1215-1238.

MALISKA, C. R. (1995) *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*, LTC, Rio de Janeiro.

MALISKA, C. R. (2004) *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional* - 2.ed. rev. e ampliada, LTC, Rio de Janeiro.

MASTBERGEN D. R. e VAN DEN BERG J. H. *Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons*. *Sedimentology*, 50(4):625-637, 2003.

MEYER-PETER, E. e MÜLLER, R. 1948. Formulas for bed-load transport, *Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research*. pp. 39–64.

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.

MOHAMMAD, M. E., AL-ANSARI, N., KNUTSSON, S., LAUE, J., (2020). “A Computational Fluid Dynamics Simulation Model of Sediment Deposition in a Storage Reservoir Subject to Water Withdrawal”. *Water*, 12, 959.

NAVIGANT CONSULTING INC. (2013). *Small Hydropower Plants - Design and Construction*. Publicado pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA).

OLIVEIRA, M. A. *Repotenciação de pequenas centrais hidrelétricas: Avaliação técnica e econômica*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia. UNIFEI, Itajubá/MG, 2012.

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.

SALIBA, A. P. M., *Notas de aula*, Modelos fundo móvel, Disciplina Introdução a Modelagem Física em Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2020.

SHIELDS, A., Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed-load Movement. *California Institute of Technology*; 1936.

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.

SOULSBY, R. L. *Dynamics of Marine Sands: a manual for practical applications*. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications, 1997.

STEFFLER, P., BLACKBURN, J. *Two-dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fish habitat*. River2D user's manual. University of Alberta; 2002.

STREETER, V. L. e WYLIE, E. B. (1980). *Semelhança e Modelo Reduzido*, São Paulo – SP.

VANONI, V. A. (1975). *Sedimentation Engineering*. ASCE, American Society of Civil Engineers. New York – NY.

VALE, V. L., FREITAS, S. P., MARTINEZ, C. B., COSTA, M. E. F. Aplicação das Equações de Equilíbrio Morfológico de Julien ao Trecho Fluvial do Reservatório da PCH Salto Paraopeba. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - SBRH*, v. 2, n. 1, p. 1-2, nov. 2013.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. (2007). *An Introduction to the computational fluid dynamics*. 2. ed. London – UK

WHITE, F. M. (2011) *Mecânica dos fluidos*. 6a Ed. Porto Alegre: AMGH.

Yang, C. T. Incipient motion and Sediment Transport, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 99, No. 10, 1973, pp. 1679-1704.

YANG, C. T. (1996) *Sediment Transport: Theory and Practice*. McGraw-Hill, New York.

ZHOU, YE., MCCOMB W. D. e VAHALA, G. Renormalization Group (RG) in Turbulence: Historical and Comparative Perspective. NASA Technical Report ICAS-97-36. 1997.