



## MODELAGEM COMPUTACIONAL DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Vitor Rocco Albernaz

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Renato Elias

Rio de Janeiro – RJ

Junho de 2024

# MODELAGEM COMPUTACIONAL DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Vitor Rocco Albernaz

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Prof. D.Sc. Renato Nascimento Elias

---

Prof. D.Sc. Alvaro Luiz Gayoso de Azeredo Coutinho

---

Prof. D.Sc. Gabriel Mário Guerra Bernadá

---

Prof. D.Sc. Adriano Maurício de Almeida Côrtes

Rio de Janeiro – RJ

Junho de 2024

**FOLHA BIBLIOTECA**

## AGRADECIMENTOS

Em 2020, iniciei o programa de mestrado de Engenharia Civil (PEC) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) como um jovem engenheiro recém-formado, com poucas experiências no mercado de trabalho, mas com uma grande paixão pela modelagem computacional. Esse foi talvez o principal motivo que me fez escolher o programa, vide que a área de concentração que eu me escrevi era Modelagem Computacional em Recursos Hídricos.

Todas as aulas foram desafiadoras a sua forma, mas os conhecimentos adquiridos nas disciplinas foram extremamente importantes para a minha formação, especialmente a disciplina de Hidráulica II com o Prof. Renato, que eventualmente se tornou o tema da minha pesquisa de mestrado.

Durante a pesquisa eu tive a oportunidade de conhecer o Alvaro e o pessoal do NACAD. Nesse período eu comecei a cursar algumas disciplinas da área de Mecânica Computacional, onde comecei a compreender a necessidade de entender "o que se passa sob o capô dos softwares", esse tipo de visão continuará comigo para a vida.

Como todos os brasileiros que passamos por 2021, nos lembramos da mudança brusca que foi a Pandemia de COVID. Esse período se provou extremamente desafiador para dar continuidade na pesquisa, foi um período dotado de notícias ruins que conseguiram invadir todos os demais aspectos da vida. Porém, como tudo na vida, ele passou e quando estava chegando ao fim, vieram algumas notícias boas, consegui um emprego em uma outra cidade, em Belo Horizonte.

Foi um grande desafio continuar a pesquisa nessas novas condições, mas agradeço especialmente ao Prof. Renato por não ter desistido de mim, pela sua paciência e orientação, que foram fundamentais para consolidar a pesquisa.

Dessa forma, eu gostaria de agradecer a cada um deles por possibilitar expandir meu conhecimento em cada uma dessas áreas, aos colegas de mestrado, principalmente os que me aguentaram todo esse período, Andressa, Arthur, Carol, Diego, Fernanda, Louise, a todos os professores que eu tive aula, Alvaro, Daniel, Paulo, Otto, Thiago, e especialmente ao Renato, aos meus novos amigos que estou tendo em Belo Horizonte, Alex, Alexandre, Antoine, Carlos, Daniel, Henrique, Ingrid, Isadora, Maurício, Nelson, Victor, Viviane. E por fim, agradeço a minha princesa, e aos meus pais e minha querida irmã. Este trabalho é fruto de um esforço coletivo, e sou eternamente grato a cada um de vocês.

Resumo da Dissertação apresentada à COPEE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

## MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Vitor Rocco Albernaz

Junho/2024

Orientador: Renato Elias

Programa: Engenharia Civil

O transporte de sedimentos, fundamental para a dinâmica da superfície terrestre, envolve a movimentação de partículas sólidas por água, vento, gelo e gravidade. A intervenção humana exacerba esses processos, aumentando a erosão e sedimentação promovendo impactos ambientais significativos. Métodos físicos, analíticos e numéricos são utilizados para estudar esses fenômenos. Graças aos avanços na capacidade computacional, o campo da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) emergiu como um método numérico de destaque, capaz de desenvolver soluções eficazes para problemas complexos. Este estudo utiliza o REEF3D, um modelo CFD *open-source* baseado em diferenças finitas, para simular o transporte de sedimentos. A solução das equações no REEF3D adota um método de projeções para a resolução do termo de pressão, associada a um método iterativo e global, o *Bi-Conjugate Gradiente Stabilized* (BiCGStab). Além disso, o *software* adota o método *level set* para lidar com as interfaces da fronteira fluida e da fronteira sólida. O objetivo é aplicar a modelagem numérica em três casos de transporte de sedimentos: dois casos de benchmark destinados a validar o modelo com base em dados experimentais, e um terceiro caso aplicado a um cenário fictício. A aplicação da modelagem numérica busca contribuir para uma melhor compreensão dos processos de transporte de sedimentos e suas implicações ambientais e industriais.

Abstract of Dissertation presented to COPEE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

## COMPUTATIONAL MODELING OF SEDIMENT TRANSPORT

Vitor Rocco Albernaz

Junho/2024

Advisor: Renato Elias

Department: Civil Engineering Program

Sediment transport, fundamental to the dynamics of the Earth's surface, involves the movement of solid particles by water, wind, ice, and gravity. Human intervention exacerbates these processes, increasing erosion and sedimentation, and causing significant environmental impacts. Physical, analytical, and numerical methods are utilized to study these phenomena. Thanks to advances in computational power, the field of Computational Fluid Dynamics (CFD) has emerged as a leading numerical method capable of developing effective solutions for complex problems. This study uses REEF3D, an open-source CFD model based on finite differences, to simulate sediment transport. The solution of the equations in REEF3D adopts a projection method for resolving the pressure term, combined with an iterative and global method, the Bi-Conjugate Gradient Stabilized (BiCGStab). Additionally, the software uses the level set method to handle fluid and solid boundary interfaces. The objective is to apply numerical modeling in three sediment transport cases: two benchmark cases aimed at validating the model based on experimental data and a third case applied to a fictitious scenario. The application of numerical modeling aims to contribute to a better understanding of sediment transport processes and their environmental and industrial implications.

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	12
2	Equações Governantes .....	16
2.1	Escoamento Incompressível.....	16
2.2	Transporte de Sedimento.....	18
2.2.1	Iminência de Movimento .....	18
2.3	Transporte Suspenso .....	20
2.4	Transporte de Fundo .....	22
2.5	Modelo de Morfologia de Fundo .....	23
3	Modelo Numérico (REEF3D).....	25
3.1	Método de Discretização.....	25
3.2	Método de Solução das Equações .....	27
3.2.1	Método de Projeção .....	27
3.3	Modelagem da Turbulência.....	28
3.3.1	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i> (RANS) .....	30
3.3.1.1	Modelos de Duas Equações .....	32
3.4	Movimentação de Malha.....	33
3.4.1	Curvas de nível ( <i>level-set</i> ) .....	33
3.5	Sand-Slide .....	35
3.6	Decomposição do Passo de Tempo.....	35
4	Resultados.....	37
4.1	Erosão em Pilar Cilíndrico .....	37
4.2	Erosão em Canal com Obstáculo .....	43
4.3	Erosão à jusante de vertedor de soleira livre com emboque .....	51
5	Conclusões.....	57
6	Bibliografia .....	59
7	Apêndice .....	61

7.1 Erosão em Pilar Cilíndrico .....	61
7.2 Erosão em Canal com Obstáculo .....	62
7.3 Erosão à jusante de vertedor de soleira espessa .....	64

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de uma partícula sujeita a força hidrodinâmica instantânea. Adaptado de Dey, 2014.....	19
Figura 2: Diagrama de Shields representando o limite do Parâmetro de Shields ( $\tau^*$ ) em função do Número de Reynolds ( $Re^*$ ). Adaptado de Dey (2014).....	20
Figura 3: Lei de Parede Adaptado de Garcia (2008).....	22
Figura 4: Método da célula fantasma na fronteira imersa (FLEIT, 2016).....	26
Figura 5: Função de marcação para o método de curvas de nível.....	34
Figura 6: Diagrama esquemático do fluxo de água e de escavações entorno de um pilar unitário, adaptado de Yincan <i>et al.</i> (2017).....	38
Figura 7: Esquema do cenário simulado para o estudo de erosão em pilar cilíndrico unitário.....	39
Figura 8: Comparação dos resultados encontrados com os de Afzal (2013).....	40
Figura 9: Magnitude de velocidades encontradas no fluido no último passo de tempo.....	40
Figura 10: Distribuição da magnitude das velocidades encontradas no último instante simulado.....	41
Figura 11: Evolução da topografia de fundo nos passos de tempo, da esquerda pra direita e de cima para baixo, 0 s, 2520 s, 5040 s e 7560 s.....	42
Figura 12: Variação da topografia de fundo em termos de mínimo e de máximo.....	43
Figura 13: Esquema do cenário simulado para o estudo de erosão em canal com obstáculo.....	44
Figura 14: Comparação dos resultados encontrados com os de Afzal (2013).....	45
Figura 15: Magnitude de velocidades encontradas no fluido no último passo de tempo.....	46
Figura 16: Distribuição da magnitude das velocidades encontradas no último instante simulado.....	46
Figura 17: Linhas de fluido em perspectiva isométrica em termos de magnitude de velocidade e velocidade na direção vertical.....	47
Figura 18: Seção S1 em termos de magnitude de velocidade e velocidade na direção o vertical.....	48
Figura 19: Seção S2 em termos de magnitude de velocidade e velocidade na direção o vertical.....	48

Figura 20: Seção S3 em termos de magnitude de velocidade e velocidade na direção o vertical.....	49
Figura 21: Seção S4 em termos de magnitude de velocidade e velocidade na direção o vertical.....	50
Figura 22: Evolução da topografia de fundo nos passos te tempo, da esquerda pra direita e de cima para baixo, 0 s, 2520 s, 5040 s e 7560 s.....	50
Figura 23: Variação da topografia de fundo em termos de mínimo e de máximo. ....	51
Figura 24: Esquema do cenário simulado para o estudo de erosão jusante de vertedor retangular. ....	52
Figura 25: Magnitude de velocidades encontradas no fluido no último passo de tempo.....	53
Figura 26: Velocidades em direção vertical encontradas no fluido no último passo de tempo	53
Figura 27: Distribuição da magnitude das velocidades encontradas no último instante simulado.....	54
Figura 28: Distribuição das velocidades em direção vertical encontradas no último instante simulado.....	54
Figura 29: Evolução da topografia de fundo nos passos te tempo, da esquerda pra direita e de cima para baixo, 50 s, 100 s, 150 s e 200 s.....	56
Figura 30: Variação da topografia de fundo em termos de mínimo e de máximo. ....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos escoamentos (Adaptado de Chanson, 2004).....	17
Tabela 2: Classificação de carga de sedimentos (GARCIA, 2008).....	18
Tabela 3: Parâmetros adotados na simulação numérica da erosão em Pilar Unitário. ....	39
Tabela 4: Parâmetros adotados na simulação numérica da erosão em Canal com Obstáculo..	44
Tabela 5: Parâmetros adotados na simulação numérica da Vertedor de Soleira Livre. ....	52

## 1 INTRODUÇÃO

O fenômeno do transporte de sedimentos é um processo natural onde partículas sólidas, tais como areais, cascalhos, ou até mesmo rochas, são movidas por agentes naturais como água, vento, gelo e gravidade. Este processo desempenha um papel crucial na dinâmica da superfície terrestre.

Dessa forma, sedimentos são uma parcela integrante do equilíbrio ecológico do meio ambiente, a ponto de possuírem um ciclo próprio. Esse ciclo inicia-se com a erosão de material rochoso em altitude, seja por forçantes naturais como a água e o vento, ou devido à atividade de plantas ou animais. O processo muitas vezes se inicia com a queda de gotas d'água, que, ao escoarem para parcelas mais baixas do terreno, carregam o material solto em direção a riachos, ravinas, córregos e rios, que agem como conduítes para a movimentação dos sedimentos. Essas partículas continuam a ser transportadas pelos cursos d'água até que a energia necessária para o transporte se esgote, indicando os locais de deposição. Feições como planícies de inundação, ilhas e deltas são caracterizadas como áreas de depósito (GARCIA, 2008).

Ao considerar a atividade humana, pode-se afirmar que os processos de erosão, transporte e sedimentação são acelerados. Como exemplo, tem-se que o fenômeno da erodibilidade do solo é acelerado por atividades agrícolas. Erosões provocam danos sérios para atividades ao reduzir a produtividade do solo. Tem-se também casos em que, a construção de vias e avenidas, ao remover a vegetação e alterar a geometria dos taludes naturais, e assim deixando-os desprotegidos, decorre em problemas de assoreamento à jusante. Atividades mineradoras introduzem grandes volumes de sedimentos diretamente em córregos naturais, suas estruturas de contenção de rejeitos contribuem continuamente para a produção, devido a erosão pela precipitação, mesmo anos após seu fechamento (JULIEN, 2010).

Dentro da hidráulica fluvial, há três abordagens que se destacam para tratar de transporte de sedimentos: os métodos de modelo físico, métodos de soluções analíticas, e métodos de soluções numéricas. Modelos físicos, ou experimentais, remetem aos laboratórios capazes de construir reproduções do ambiente estudado, onde é possível produzir os fenômenos que se deseja prever, tal opção, porém implica em custos elevados e limitações quanto a escalabilidade. As soluções analíticas são mais simples, Widera (2010) comenta que esse tipo de solução é o mais comum na indústria, normalmente são fórmulas empíricas, aplicáveis somente em casos particulares, e que essa abordagem pode implicar em resultados dezenas de vezes discrepante ao alterar-se a fórmula utilizada.

Diante do aumento da complexidade dos problemas, faz-se necessário desenvolver alternativas às abordagens analíticas e empíricas. Este desafio encontrou solução com avanços

tecnológicos, como o surgimento dos computadores, que viabilizaram o estudo de fluidos por métodos numéricos, que se tornaram mais acessíveis e eficazes (FERZIGER, 2020). Esse campo é conhecido como dinâmica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) e é aplicado em diversas áreas, como a indústria aeroespacial, modelagem climática, a indústria do petróleo, e a hidráulica computacional.

Garcia (2008) afirma que o campo do transporte de sedimentos consiste num tipo de transporte granular de partículas por fluidos, como escoamento bifásico, onde uma fase é líquida e a outra é sólida.

A parcela líquida do escoamento é normalmente resolvida por duas equações, a conservação de massa e a conservação de momento, também conhecidas como equações de Navier-Stokes (NS), batizadas em homenagem aos trabalhos do engenheiro e físico francês Claude Lois Marie Henri Navier (1785-1836) e do matemático e físico irlandês George Gabriel Stokes (1819-1903). Como consta em Elias (2007): “As equações [...] estabelecem que as mudanças na quantidade de movimento de um volume de fluido infinitesimal estão relacionadas à soma da dissipação de forças viscosas (tensões cisalhantes), da variação de pressão (tensões normais), da força gravitacional, dentre outras forças que atuam no interior do mesmo. O que, de fato, constitui-se como uma aplicação da segunda lei de Newton.”

Para a parcela sólida, Garcia (2008) caracteriza o transporte de sedimentos em dois tipos, denominadas carga suspensa e carga de fundo. A carga de sedimentos suspensos está relacionada com a turbulência do fluido, onde o sedimento é transportado com a mesma velocidade da fase líquida, enquanto a carga de fundo, encontra similaridades com o conceito de “fundo móvel”, onde as partículas sólidas mais próximas ao fundo têm condições de rolar, saltar ou serem arrastadas, devido ao arraste de fundo decorrente da velocidade da fase líquida no canal.

O desafio ao modelar fenômenos de escoamento bifásico conforme descrito é solucionado pela resolução das Equações de NS, com a presença de turbulência, e acoplado aos transportes de sedimentos em suspensão e de fundo. Ferziger (2020) apresenta quatro abordagens para tratar de fluxos turbulentos, sendo que a terceira se refere a modelagem numérica da turbulência. Essa abordagem é baseada no conceito de decomposição das escalas da turbulência em componentes médios e flutuantes (POPE, 2000), para contornar a necessidade de representar todas as escalas de turbulência (STEIN, 2017). A decomposição das escalas de turbulência é tipicamente efetuada via filtragem temporal e espacial, conforme os métodos de *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS) e de *large-eddy simulation* (LES). O método RANS é caracterizado por adotar uma média das equações de movimento, nesse método as flutuações

turbulentas são obtidas pela aplicação de um filtro temporal para a parcela flutuante (RODI *et al.*, 2013). O método do LES, por outro lado, encontra a parcela média da velocidade por métodos de filtragem espaciais, dessa forma o método se propõe a resolver os turbilhões (*eddys*) de larga escala enquanto aproxima ou modela os de pequena escala. No presente estudo será adotado a abordagem da modelagem da turbulência pelo método de RANS

Ainda acerca dos métodos para lidar com os tipos de transporte, o Transporte Suspenso é interpretado como uma equação de Transporte Advectivo-Difusivo, a ser calculado a partir dos campos de velocidade e pressão encontrados nas equações que tratam da parcela fluida. E o Transporte de Fundo é relacionado ao efeito da tensão de arrasto gerada pelo deslocamento do fluido. Por fim, pode-se fechar o arranjo das principais equações com a Equação de Exner (GARCIA, 2008). Que representa a alteração da fronteira sólida do domínio, seja por deposição do transporte suspenso, ou erosão do transporte de fundo. Assim, um dos maiores desafios desse tipo de problema é representar como se dá o comportamento nessa fronteira mantendo a conservação de massa.

O presente estudo visa aplicar a modelagem numérica em casos de transporte de sedimentos utilizando o modelo computacional *open-source* CFD REEF3D, proposto por Bihs (2011) ao estudar escavações localizadas em canais abertos. Outros estudos também empregaram o REEF3D para simular diferentes casos, Afzal *et al.* (2014) investigou efeitos erosivos em bases de píeres sob influência de ondas, um estudo semelhante foi realizado por Ahmad *et al.* (2015b) ao estudar diferentes configurações de pilares para minimizar as escavações em condições de ondas e correntes, Sreedhara *et al.* (2016) estudaram pilares de diferentes formas, Ahmed *et al.* (2018) conduziu estudos para estimar as escavações próximas a tubulações (*pipeline*) sob efeitos de ondas e correntes. Ahmad *et al.* (2019) estudaram dessa vez estruturas mais complexas como jaquetas (*jacket structure*) as utilizadas para sustentar aerogeradores. Além disso, em estudos mais recentes, Afzal *et al.* (2020) examinaram diversos aspectos das formulações do REEF3D aplicando em casos de correntes contínuas em canais abertos com obstáculo lateral (*abutment*).

Conforme descrito por Afzal (2013), o REEF3D adota o método de *level set* para calcular a superfície livre para representar a interface entre as duas fases, sendo a água e o ar. A camada de sedimentos móveis também é tratada por meio de um método de *level set*, sendo que as taxas de transporte de sedimentos são resolvidas por equações tradicionais com o arraste de fundo como o principal fator para acoplar a hidrodinâmica com o transporte de sedimentos. Dessa forma, converte-se os efeitos hidrodinâmicos em taxa de variação vertical do fundo, resultando em erosão ou deposição. Os principais ganhos dessa abordagem referem-se em definir com

facilidade a topologia do fundo pelo cálculo da incipiência de movimento, e que se evita instabilidades numéricas pois as geometrias complexas são calculadas pelo método da fronteira imersa.

O primeiro capítulo dessa dissertação trata de apresentar as equações governantes que regem o problema, esse item representa a modelagem matemática relacionada ao escoamento bifásico incompressível com transporte de sedimentos. Em seguida tem-se a apresentação do *software* REEF3D, com o objetivo de discutir as ferramentas do modelo que são utilizados na presente dissertação. O terceiro capítulo apresenta os estudos de casos, baseados em experimentos para avaliar a capacidade do modelo. O último capítulo apresenta as conclusões finais e perspectivas para trabalhos futuros.

## 2 EQUAÇÕES GOVERNANTES

Nesse capítulo apresenta-se os princípios que fundamentam a mecânica de fluidos computacional no contexto de modelagem do transporte de sedimentos. Inicialmente caracteriza-se a parcela fluida do sistema, culminando com as Equações de Navier-Stokes na forma como são usadas no decorrer do trabalho. A seção posterior trata de apresentar o fenômeno de transporte de sedimentos para em seguida, nas seções seguintes, apresentar como se dá a modelagem da parcela suspensa do transporte, da parcela de fundo. Por fim, na última seção apresenta-se um modelo que calcula a atualização do leito com base nos resultados hidrodinâmicos e das equações de transporte.

### 2.1 ESCOAMENTO INCOMPRESSÍVEL

Fluidos são substâncias compostas por uma estrutura molecular, sendo líquidos ou gasosos, e respeitam às leis de Newton. Embora os fluidos tenham uma estrutura molecular complexa, na modelagem de escoamentos incompressíveis, considera-se o comportamento do fluido como uma substância contínua (*continuum*), focando principalmente nos efeitos macroscópicos, e desconsiderando os efeitos microscópicos, como de interação entre moléculas. Ao considerar velocidades muito baixas, caracterizadas por números de Reynolds menores que 2.000, e desconsiderar a inércia do fluido, tem-se a denominação de escoamento viscoso. Conforme a velocidade aumenta, a inércia se torna mais importante e as partículas vêm a se movimentar com uma trajetória suave; esse comportamento é conhecido como escoamento laminar. O incremento subsequente de velocidade vem a desenvolver instabilidades, devido às interações de natureza caóticas das partículas de fluido entre si, o que é conhecido como turbulência (o tema virá a ser discutido numa seção própria), e escoamentos com essas características são denominados de turbulentos (FERZIGER *et al.* 2020).

A diferença entre os tipos de comportamento para fluidos foi originalmente estudada por Osborne Reynolds (REYNOLDS, 1883), uma forma de caracterização, do comportamento em que um fluido se encontra, é por meio do Número de Reynolds ( $Re$ ). Obtém-se o  $Re$ , para um canal de superfície livre, pela seguinte equação:

$$Re = \frac{u(4R_h)}{\nu} \quad (1)$$

onde  $R_h$  representa o raio hidráulico do canal,  $u$  representa a velocidade do fluido, e  $\nu$  a viscosidade cinemática.

É comum que o fluido seja considerado em escoamento laminar para  $Re$  menores que 2000 (CHANSON, 2004). Outro conceito também adotado para caracterizar escoamentos em

canais abertos refere-se ao Número de Reynolds de Cisalhamento, do inglês *Shear Reynolds Number* ( $Re_*$ ) que caracteriza os fluxos turbulentos em suaves, em transição e altamente turbulentos (CHANSON, 2004). Define-se  $Re_*$  como:

$$Re_* = \frac{u_* k_s}{\nu} \quad (2)$$

onde  $k_s$  representa a rugosidade média do fundo, e  $u_*$  a velocidade característica do fundo. A situação do escoamento é caracterizada segundo Henderson (1966) pelos valores indicados na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação dos escoamentos (Adaptado de Chanson, 2004)

Situação do Fluido	Fluxo em canal livre (Henderson, 1966)
Turbulento suave	$Re_* < 4$
Em transição	$4 < Re_* < 100$
Altamente turbulento	$100 < Re_*$

Na dinâmica de fluidos computacional (CFD), o comportamento dos fluidos é baseado na solução aproximada das equações de NS e associando outra equação para transportar uma grandeza escalar, como a temperatura ou concentração de uma substância, como no presente caso para representar a fração mássica de sedimentos. O campo de velocidade e a pressão ( $\mathbf{u}$  e  $p$ ) de um fluido viscoso e incompressível são governados pelo balanço de quantidade de movimento e de massa, respectivamente pelas equações:

$$\rho \left( \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{f} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

onde  $\rho$  representa a massa específica do fluido, no caso considerada como constante devido a condição de escoamento incompressível,  $t$  denota o tempo,  $\mathbf{f}$  o vetor de forças e  $\boldsymbol{\sigma}$  o tensor de tensões.

As forças que agem no corpo são separadas em dois tipos, internas, ou de superfície e externas, ou forças de corpo. Para fluidos newtonianos, o tensor de tensões  $\boldsymbol{\sigma}$ , é expresso por:

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \mathbf{T} \quad (5)$$

onde  $p$  é a pressão hidrostática,  $\mathbf{I}$  é o tensor identidade, e  $\mathbf{T}$  é o tensor taxa de deformação, devidos tensões cisalhantes e representado como:

$$\mathbf{T} = 2\mu\mathbf{D} \quad (6)$$

o termo  $\mathbf{D}$  representa a taxa de deformação como:

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla\mathbf{u} + \nabla^T\mathbf{u}) \quad (7)$$

As forças externas, representadas pelo termo  $\mathbf{f}$ , são também conhecidas como forças de corpo, onde a mais comum é a gravidade.

Nos estudos desenvolvidos foi adotado uma versão simplificada das Equações de NS, denominado de Equações de RANS. O método será discutido na Seção 3.3, porém cabe adiantar que o método resolve os componentes médios dos vetores velocidades e os efeitos das flutuações são aproximados pela introdução do termo de viscosidade turbulenta.

## 2.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTO

Garcia (2008), apresenta duas formas de classificar o transporte de sedimentos baseado no tamanho das partículas. A Tabela 2 apresenta estas classificações.

Tabela 2: Classificação de carga de sedimentos (GARCIA, 2008)

Referência	Sistema de Classificação	
	Carga de Transporte de Sedimentos	Baseado no mecanismo de transporte
Lavado	Transporte Suspenso	Material lavado
Suspenso		Material de fundo
Fundo	Transporte de Fundo	

Pelo sistema baseado no mecanismo de transporte, divide-se o transporte em duas parcelas, uma parcela dissolvida na coluna de água, que por sua vez é conhecida como **Transporte Suspenso**, e o **Transporte de Fundo**, relacionado às partículas que se movimentam por mecanismos de deslizamento, rolamento, ou viajam por séries de saltos sucessivos (saltação) (DEY, 2014).

### 2.2.1 Iminência de Movimento

Uma partícula de sedimento em repouso no fundo, tende a permanecer em repouso até o momento em que um limiar de arrasto é superado. Segundo Dey (2014), o conceito de limiar do arraste de fundo tem sido amplamente aplicado para determinar a iminência de movimento de partículas com resultados satisfatórios. A origem do conceito remete a análise de resultados experimentais e de campo, em que se relacionou efeitos hidrodinâmicos, causados pela movimentação do fluido e pela estabilização do empuxo da partícula, com a iminência do movimento do fundo a partir do arrasto, decorrendo num parâmetro adimensional denominado de parâmetro de Shields. Dey (2014) constata que a adoção de modelos analíticos para

representar os resultados empíricos resulta em um método semi-teórico, os estudos de Shields (1936) são pioneiros nessa abordagem.

Os resultados dos experimentos indicaram que a partir de um determinado valor de velocidade as partículas começam a se movimentar, ou seja, a força oriunda do movimento do fluido se torna superior a força de estabilização decorrendo em mobilização das partículas de fundo. Garcia (2008) estabelece que os fatores que influenciam a mobilização do fundo podem ser separados em duas categorias, as aleatórias e as relacionadas às forças que agem nos grãos.

Os fatores aleatórios são subdivididos em posicionamento dos grãos no fundo e a turbulência gerada pelo fluido. As forças são divididas em relação à gravidade, e as forças oriundas do fluido, no caso o arrasto e a flutuação, traduzidas do inglês como *drag* e *lift*, respectivamente. É desejável que se tenha algum meio de estabelecer um valor crítico de arrasto, ou seja, estabelecer uma relação entre os fatores derivados dos grãos e do fluido, para determinar se o grão será mobilizado ou não, nesse contexto, surge o parâmetro crítico de Shields. Apresenta-se na Figura 1 um esquema das forças que agem na partícula.

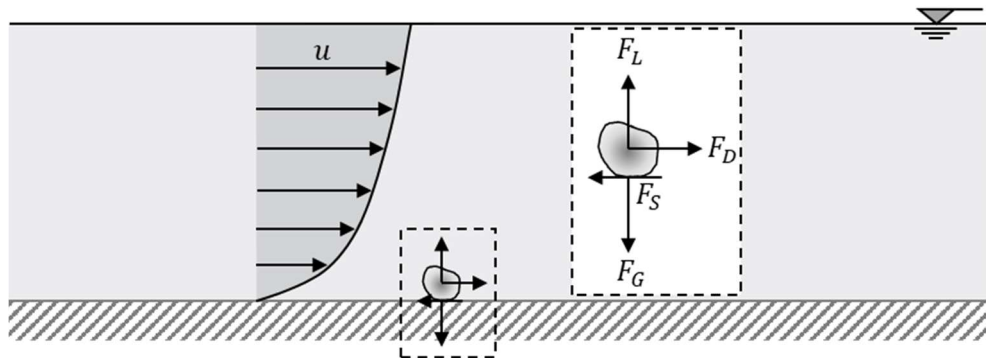


Figura 1: Esquema de uma partícula sujeita a força hidrodinâmica instantânea. Adaptado de Dey, 2014.

A principal conclusão dos estudos de Shields (1936) foi de relacionar os efeitos hidrodinâmicos do fluido com a iminência de movimento, representados respectivamente pelo de Cisalhamento ( $Re_*$ ) e pelo Parâmetro de Shields ( $\tau^*$ ), decorrendo em um diagrama que indica iminência de movimento, conforme observa-se no Diagrama de Shields representado na Figura 2.

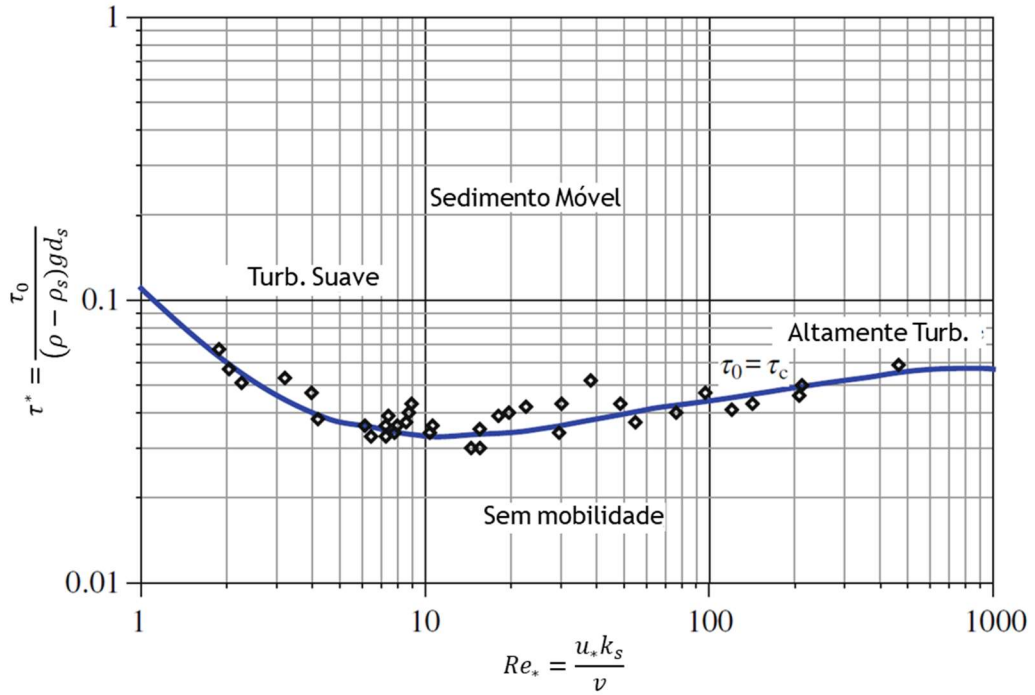


Figura 2: Diagrama de Shields representando o limite do Parâmetro de Shields ( $\tau^*$ ) em função do Número de Reynolds ( $Re_*$ ). Adaptado de Dey (2014)

A curva apresentada pelo diagrama indica condições de estabilidade para a movimentação do fundo, ou seja, caso se tenha valores acima da curva, há condições para mobilizar o fundo. A curva apresentada na Figura 2 representa o arraste de fundo crítico adimensional de Shields ( $\tau_c^*$ ):

$$\tau_c^* = \frac{\tau_{c,i}}{(\rho - \rho_s)gd_i} \quad (8)$$

onde  $\tau_{c,i}$  representa o arraste de fundo crítico de Shields para os grãos de diâmetro definido por  $d_i$ , sendo o termo  $i$  relacionado o diâmetro característico adotado, normalmente adota-se o médio, referente a 50%, ou seja  $d_{50}$ . O termo  $g$  representa a aceleração da gravidade e os termos  $\rho$  e  $\rho_s$ , referem-se, respectivamente à massa específica do fluido e do sedimento.

### 2.3 TRANSPORTE SUSPENSO

O Transporte Suspenso é tratado por meio da equação de transporte advectivo-difusivo, expresso a partir da seguinte equação:

$$\frac{dc_a}{dt} + \mathbf{u} \cdot \nabla c_a = \nabla \cdot (\Gamma \nabla c_a) \quad (9)$$

nessa equação,  $c_a$  representa a grandeza transportada, no caso a concentração de sedimentos suspenso, o primeiro termo representa a variação temporal, o segundo termo o processo advectivo devido ao campo de velocidade  $\mathbf{u}$ , e ao lado direito, os efeitos difusivos.

A equação deve ser resolvida de forma acoplada às equações de escoamento incompressível, onde o termo  $\mathbf{u}$  representa o vetor velocidade que é encontrado pela equação:

$$\mathbf{u} = u_f + u_s \quad (10)$$

onde  $u_f$  representa a velocidade do fluido calculada pela equação de Navier-Stokes, e o termo vertical pela velocidade de queda. O conceito representa a velocidade de equilíbrio para um fluido em trajetória de queda em um meio fluido (DEY. 2014).

Nesta pesquisa, ao realizar as simulações, foi adotado o valor de velocidade de queda ( $u_s$ ) conforme apresentado nos estudos de casos em que essa informação estava disponível. Nos casos em que o valor não foi especificado, optou-se por empregar a equação de Soulsby (1997) para determinar um valor constante para a velocidade de queda ( $u_s$ ) a partir de características do sedimento transportado:

$$u_s = \frac{v}{d_{50}} [(10,36^2 + 1,049D_*^3)^{\frac{1}{2}} - 10,36] \quad (11)$$

na equação anterior,  $d_{50}$  refere-se ao diâmetro médio dos grãos, e o Diâmetro de Partícula Adimensional ( $D_*$ ) pode ser encontrado pela seguinte equação:

$$D_* = \left( \frac{g(\rho_s - 1)}{v^2} \right)^{1/3} d_{50} \quad (12)$$

nesse caso,  $v$  é a viscosidade cinemática da água,  $g$  representa a aceleração da gravidade, e  $\rho_s$  é o peso específica do grão.

As concentrações de sedimento suspenso nas células do fundo são utilizadas como condição de contorno para a resolução da equação advectiva-difusiva, que em seguida aplicada ao resto do domínio computacional (Afzal, 2014). Assim calcula-se a taxa de deposição no fundo devido ao transporte suspenso ( $D$ ) pela equação:

$$D = u_s c_a \quad (13)$$

onde o valor de  $c_a$  corresponde à concentração dados os resultados da Equação (9) no centro da célula mais próxima ao fundo (FLEIT, 2016).

A taxa de incorporação de sedimento no fundo, do inglês, “*entrainment*” ( $E$ ), por sua vez é encontrada na aplicação da equação:

$$E = u_s c_b \quad (14)$$

o valor de  $c_b$  é encontrado pela equação de van Rijn (1984b).

$$c_b = 0,015 \frac{D_{50}}{b} \frac{((\tau - \tau_c^*)/\tau_c^*)^{1,5}}{D_*^{0,3}} \quad (15)$$

para van Rijn (1984b),  $b$  é 0,05 vezes a profundidade do nível de água a partir do fundo.

## 2.4 TRANSPORTE DE FUNDO

A distribuição do campo de velocidades em um canal genérico de superfície livre unidimensional apresenta-se conforme ilustrado na Figura 3 (GARCIA, 2008). Em uma seção retangular constante, onde a profundidade média é representada por  $h$ , e a velocidade média por  $u$ , considera-se que no fundo o diâmetro médio  $d$  dos sedimentos, a rugosidade é expressa por  $k_s$  (proporcional ao diâmetro do grão do fundo) e a declividade de fundo é representado por  $S$ . Esse esquema está representado na Figura 3.

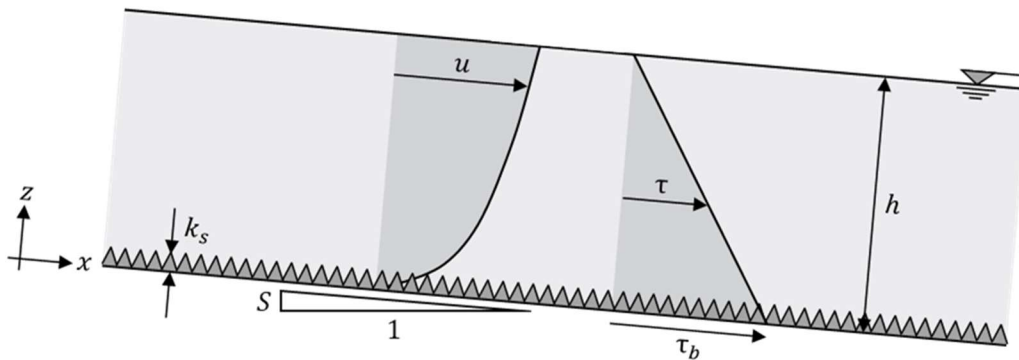


Figura 3: Lei de Parede Adaptado de Garcia (2008).

Forças são geradas no fundo devido ao peso e ao movimento do fluido, essas forças são conhecidas como arrasto de fundo  $\tau_b$  (GARCIA, 2008), que no caso de fluxo uniforme é expresso como:

$$\tau_0 = \rho g h S \quad (16)$$

A partir do mostrado pela Figura 3, em um contexto de fluxo uniforme, o valor do arrasto ( $\tau$ ), na coluna de água varia linearmente na vertical, e expresso por:

$$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (17)$$

onde  $z$  é a altura onde se deseja obter o arrasto e  $\tau_0$  representa o arrasto de fundo. É possível estabelecer uma velocidade característica de fundo ( $u_*$ ):

$$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho} \quad (18)$$

Outra forma para calcular diretamente o arraste de fundo ( $\tau$ ) considera a adoção de um parâmetro que represente os efeitos da turbulência no arraste de fundo além do gradiente de velocidade vertical. A formulação empregada no estudo foi previamente adotada por Afzal *et al.* (2015) e Ahmad *et al.* (2015a) em que encontrou resultados satisfatórios para erosões locais no entorno de estruturas. A formulação foi apresentada por Zeng *et al.* (2005) com a seguinte forma:

$$\tau = -\rho(v_t + v) \frac{du}{dz} \quad (19)$$

em que  $v_t$  representa a viscosidade turbulenta e é encontrada por algum modelo próprio. Os modelos são discutidos no Seção 3.3.

É usual encontrar na literatura métodos diversos para o cálculo da taxa de transporte de fundo, normalmente os métodos são baseados nas equações em sua forma adimensional (FLEIT, 2016), como em:

$$\tau^* = \frac{\tau}{(\rho - \rho_s)gd_i} \quad (20)$$

$$\tau_c^* = \frac{\tau_{c,i}}{(\rho - \rho_s)gd_i} \quad (21)$$

$$q_b^* = \frac{q_{b,i}}{\sqrt{\frac{(\rho - \rho_s)g}{\rho}} d_i} \quad (22)$$

os termos  $\tau^*$ ,  $\tau_c^*$  e  $q_b^*$  representam, respectivamente, o arraste adimensional, o arraste crítico de Shields adimensional, e a carga de fundo em termos adimensionais. Encontra-se na literatura diversas fórmulas para o valor de  $q_b$ , destaca-se que tais fórmulas foram desenvolvidas essencialmente de forma unidimensional. Como exemplo tem-se a equação de van Rijn.

A Equação de van Rijn (1984a) é expressa como:

$$q_b^* = 0,053 \frac{((\tau - \tau_c^*)/\tau_c^*)^{2,1}}{D_*^{0,3}} \quad (23)$$

onde encontra-se o termo  $D_*$  foi apresentado na Equação (12).

## 2.5 MODELO DE MORFOLOGIA DE FUNDO

Para quantificar o transporte de sedimentos e modelar a evolução do fundo, utiliza-se abordagens baseados no método de level-set. Esses métodos serão detalhados posteriormente na Seção 3.4.1, mas resumidamente envolvem o uso de uma função sinal suavizado para descrever a movimentação da interface entre o sedimento e a água (FLEIT, 2016). A equação fundamental que descreve essa evolução é:

$$\frac{d\phi}{dt} + F|\nabla\phi| = 0 \quad (24)$$

onde  $\phi$  é a função de level-set que define a posição da interface e  $F$  a velocidade de propagação normal à interface. A velocidade  $F$  é expressa como:

$$F = \frac{\partial\eta}{\partial t} \quad (25)$$

em que o termo  $\eta$  remete a elevação do fundo tomando como referência um fundo imóvel (*datum*). Dessa forma, pode-se desenvolver uma equação que represente a evolução da fronteira de sedimentos no tempo a partir do balanço de massa oriundos dos processos de deposição e erosão, que são governados pelo transporte de sedimentos de fundo e suspenso. Esse comportamento é descrito pela Equação de Exner (1925):

$$\begin{aligned}
 (1 - \rho_0) \frac{\partial \eta}{\partial t} &= - \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} - \frac{\partial q_{by}}{\partial y} - E + D \\
 &= \underbrace{- \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} - \frac{\partial q_{by}}{\partial y}}_{\text{Transporte Fundo}} + \underbrace{u_s(c_a - c_b)}_{\text{Transporte Suspenso}}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

em que o termo  $\rho_0$  remete a porosidade do sedimento,  $q_{bx}$  e  $q_{by}$  são os fluxos de sedimento de fundo nas direções x e y, respectivamente,  $E$  representa a taxa de erosão e  $D$  a taxa de deposição.

Para resolver essa equação, é necessário primeiro obter os valores dos transportes de sedimentos suspensos e de fundo a partir das equações de Navier-Stokes (NS), que governam o comportamento do fluido. A solução das equações de NS fornece os fluxos de sedimentos ( $q_{bx}$  e  $q_{by}$ ) e as taxas de erosão e deposição ( $E$  e  $D$ ), e com esses valores resolve-se a equação (26) para encontrar a posição da superfície de sedimentos que é atualizada a cada passo de tempo morfológico (AFZAL, 2014).

### 3 MODELO NUMÉRICO (REEF3D)

Neste capítulo, será apresentado as especificidades e características do modelo REEF3D, utilizado neste estudo. Será abordada o Método das Diferenças Finitas para a discretização do domínio, a resolução das equações de Navier-Stokes para escoamento incompressível por meio do método das projeções e os *solvers* globais empregados, como é abordado o fenômeno da turbulência para o fechamento das equações de NS, a metodologia de movimentação de malha, e algumas particularidades adotadas pelo REEF3D, como o seu método de deslizamento de fundo (*sand-slide*) e de decomposição do passo temporal.

#### 3.1 MÉTODO DE DISCRETIZAÇÃO

O processo de discretização é crucial para transformar as equações diferenciais em um sistema algébrico para as variáveis em algum nível de discretização no espaço e no tempo (FERZIGER *et al.*, 2020). Existem diferentes métodos de discretização disponíveis, sendo os principais Diferenças Finitas, Volume Finitos e Elementos Finitos.

O método das Diferenças Finitas é um dos métodos mais antigos e simples para solução de problemas associados a equações diferenciais. Ele consiste em dividir o domínio em uma malha, onde cada ponto representa um nó. As equações do sistema são resolvidas em cada nó por um método de aproximação da solução. A aproximação é uma característica importante, pois permite que se aumente a ordem da solução do problema ao adotar um método mais complexo. A principal vantagem deste método é a sua simplicidade de aplicação. No entanto, ele é mais adequado para malhas regulares, uma desvantagem no caso de geometrias complexas.

O modelo REEF3D utiliza o método das Diferenças Finitas em sua forma conservativa, que é formulado de maneira a ter as mesmas propriedades de conservação que o método de volumes finitos (AFZAL, 2013). O software conta com uma variedade de esquemas para os termos convectivos, desde os mais simples, como *First Order Upwind* (FOU), *Central Difference Scheme* (CDS), até esquemas mais elaborados, como *Weighted Essentially Non-Oscillatory* (WENO) (AFZAL, 2013). Neste trabalho, foi utilizado exclusivamente o esquema WENO conforme apresentado por Liu *et al.* (1994).

Para a discretização temporal no REEF3D, são utilizados esquemas explícitos devido a sua facilidade de implementação e paralelização, o que requer que seja adotado passos de tempo menores para garantir a estabilidade (AFZAL, 2013). As opções implementadas no REEF3D são Adam-Bashforth e *Total Variance Diminishing* (TVD) Runge-Kutta, o presente estudo se

limitou a adotar o método TVD Runge-Kutta de 3ª ordem conforme consta em Gottlieb e Shu, (1998).

Como o método é explícito, é necessário que se utilize algum tipo de restrição para garantir a estabilidade numérica e a convergência do cálculo. O REEF3D utiliza a condição Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), representada em sua forma unidimensional como:

$$\frac{u\Delta t}{\Delta x} \leq C \quad (27)$$

Esse coeficiente é comumente utilizado para avaliar o tamanho do passo da solução, principalmente em esquemas explícitos. Normalmente é definido um valor de  $C$  igual a 0,3, porém é viável a utilização de valores inferiores. Em passos de tempo adaptativo, utiliza-se esse coeficiente para implementar o chamado de condição CFL, onde o tamanho do passo é determinado a partir de valores máximos de velocidade, viscosidade, do volume e das forças de superfícies (FLEIT, 2016).

Conforme discutido, uma das características do Método DF está relacionado com a adoção de malhas estruturadas, fator que compromete a acurácia da representação de superfícies complexas. Para contornar essa situação o REEF3D utiliza o método denominado de *Ghost Cell Immersed Boundary* (BERTHELSEN *et al.*, 2008). A proposta do método é que a solução seja extrapolada para a região sólida fora do domínio, em que as células são fictícias e chamadas de células fantasmas. Isso garante que as condições de contorno sejam aplicadas implicitamente e que a discretização numérica não precise considerar as condições de contorno explicitamente (AFZAL, 2013). Observa-se na Figura 4 a extrapolação por linhas ortogonais através fronteira sólida até as células fantasmas (GC).

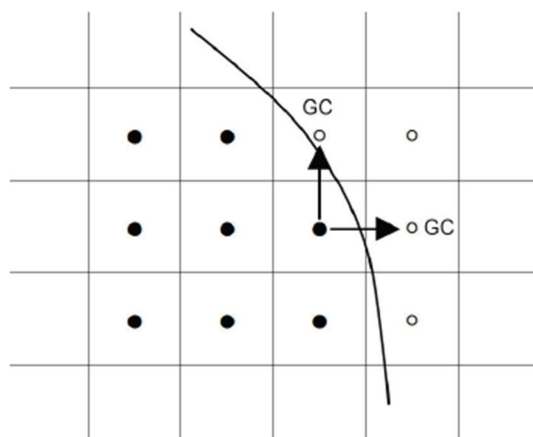


Figura 4: Método da célula fantasma na fronteira imersa (FLEIT, 2016).

## 3.2 MÉTODO DE SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES

No software REEF3D, são implementados métodos de resolução das Equações de Navier-Stokes que incorporam algoritmos destinados a lidar com o termo de pressão. Nos estudos desenvolvidos é adotado o Método das Projeções associado ao Método dos Gradientes Conjugados para resolver a Equação de Poisson.

### 3.2.1 Método de Projeção

O Método de Projeção implementado no REEF3D foi originalmente proposto por Chorin (1968) e adaptado para incluir apenas um passo intermediário (FLEIT, 2016). Para melhor descrever o método, apresentam-se a seguir as equações de Navier-Stokes na forma simplificada das Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS). Ressalta-se que essas equações serão discutidas em detalhes na Seção 3.3.1.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (v + vt) \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) + g_i \quad (28)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (29)$$

na equação anterior, os índices  $i$  e  $j$  referem-se as coordenadas espaciais  $x_i, x_j, i, j = 1, 2, 3$ . O termo  $t$  refere-se ao tempo.

A resolução das equações de Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) exige a solução do termo de pressão, o que representa um desafio significativo, pois essas equações não incluem uma equação direta para a advecção da pressão. Como resultado, a determinação direta da pressão nos pontos subsequentes da malha não é possível (FLEIT, 2016). Dentre os métodos para lidar com esse cenário, tem-se o Método das Projeções.

O primeiro passo para aplicação do método é de calcular o campo de velocidade intermediário, desconsiderando o termo de pressão:

$$\frac{\partial (U_i^* - U_i^n)}{\partial t} = -U_j^n \frac{\partial U_i^n}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (v + vt) \left( \frac{\partial U_i^n}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j^n}{\partial x_i} \right) \right) + g_i \quad (30)$$

o índice  $n$  representa o passo de tempo atual, os valores referentes aos termos de velocidade ( $U$ ) são conhecidos, enquanto o termo  $U^*$  está em um instante fictício, funcionando como uma velocidade auxiliar.

O segundo passo é de calcular o campo de velocidade para o próximo instante, utilizando a pressão desse instante futuro.

$$\frac{\partial(U_i^{n+1} + U_i^*)}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^{n+1}}{\partial x_i} \quad (31)$$

da equação anterior, o termo referente a pressão ( $P^{n+1}$ ) se encontra desconhecido, e segundo o método, ao aplicar um operador divergente na equação e adotando a condição  $U_i^{n+1} = 0$ , que decorre da equação da continuidade (FLEIT, 2016). A equação encontrada tem a forma de uma Equação de Poisson não linear, conforme:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} \right) = -\frac{1}{\Delta t} \frac{\partial U_i^*}{\partial t} \quad (32)$$

O valor obtido desta equação é empregado na Equação (31) para encontrar o campo de velocidades no próximo instante, garantindo assim a satisfação da Equação de Continuidade e fornecendo uma solução para as equações em (30).

Ferziger (2020) recomenda a adoção de técnicas iterativas ao invés de métodos diretos para resolução de sistemas formados por equações não lineares como a Equação (32), dentro diversos motivos para a recomendação, destaca-se que o erro de discretização é muito superior a acurácia da computação aritmética e dessa forma não tem necessidade de buscar acurácia tão elevada.

No campo dos métodos iterativos tem-se ainda uma subdivisão em métodos de Newton e métodos globais. O método de Newton depende de a escolha adequada para a solução inicial para garantir uma rápida convergência, mas com a desvantagem de poder divergir se o chute inicial não for adequado. Em contraste, métodos globais são garantidos de encontrar a solução, porém não tão rapidamente.

Entre os métodos globais, será utilizado no presente estudo o método de Krylov. O objetivo desses métodos é essencialmente de criar esquemas para reduzir grandes sistemas lineares de equações a problemas menores ao criar aproximações para a matriz e, em seguida, utilizar essas aproximações no processo de iteração (FERZIGER, 2020). Dentro dessa classe, será utilizado um método do tipo de Gradiente Conjugado (HESTENES e STIEFEL, 1952), especificamente o método *Bi-Conjugate Gradient Stabilized* (BiCGStab) (VORST, 1992), que é particularmente eficaz para resolver sistemas lineares grandes e esparsos, proporcionando uma combinação de robustez e eficiência."

### 3.3 MODELAGEM DA TURBULÊNCIA

Turbulência é um fenômeno natural e identificado na natureza, é inerente ao deslocamento dos fluidos. Reynolds (1883) realizou experimentos em que utilizou canos transparentes de diferentes espessuras sob diferentes velocidades para estudar as conexões entre

a resistência do fluido ao deslocamento com a sua velocidade. Observou-se nos experimentos que as linhas de corrente se tornaram difusas ao aumentar a velocidade do escoamento. Isso indica a transição de um fluxo laminar, onde as linhas são bem definidas, para um fluxo turbulento, caracterizado por flutuações de velocidade e a formação de redemoinhos, também conhecidos como *eddys*. A distinção entre comportamentos laminar e turbulento nem sempre é clara, havendo casos de transição entre os dois.

Os redemoinhos ocorrem em diferentes escalas, variando em tamanho e duração, porém é comum diferenciá-los em dois grupos, os de larga escala e os de pequena escala. Os vórtices maiores carregam a maior parte da energia do escoamento, essa energia é constantemente transferida para os vórtices de menores escalas, até os mesmos virem a se dissipar na forma de calor devido a ação da viscosidade molecular (WILCOX, 2006), esse processo de transferência de energia é conhecido como “cascata de energia”. Contudo, também ocorre transferência de energia na direção oposta, com os turbilhões menores transferindo energia aos maiores, esse fenômeno é conhecido como *backscatter*. Independente da diferença entre os *eddys*, mesmo os menores ainda são maiores que uma escala de molécula, assim a Turbulência é um fenômeno do *continuum*, e dependendo da discretização utilizada, é representado pelo conjunto das Equações de NS e da Continuidade.

Tendo em vista a complexidade do fenômeno, tem-se desenvolvido diversas abordagens diferentes para tratá-lo na engenharia. Ferziger *et al.* (2020) divide as abordagens para tratar de turbulência em quatro:

- A primeira abordagem é referente ao uso de correlações, o autor caracteriza essa abordagem com inferência do valor do fluxo turbulento em função do número de Reynolds, ou de Prandtl. Essa abordagem acaba sendo limitada a certas condições de uso, dentro da prática do estudo de sedimentos, relaciona-se com o uso das equações analíticas.
- A segunda abordagem é referente ao uso de equações integrais, que se resume a integrar as equações de momento sobre uma das coordenadas. Essa abordagem implica em equações que sejam resolvidas de forma mais simples e com menor custo computacional, um paralelo com esse procedimento seria o uso das equações de águas rasas (SWE), que são derivadas por meio da integração da profundidade das Equações de NS.
- A terceira abordagem é relacionada com a ideia de que as equações de momento, separadas entre componentes médios e flutuações dos mesmos, contudo, essa implica em que se introduza aproximações, no caso, denominados de modelos de

turbulência. A abordagem é subdividida em relação ao processo para se obter tais valores. O autor comenta sobre dois subgrupos, *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) e *Large-eddy Simulation* (LES).

- A quarta abordagem é conhecida como *Direct Numerical Simulation* (DNS), na qual se tem a resolução das Equações de NS diretamente. Uma simulação válida deve acomodar toda a gama de escalas, incluindo as menores onde a viscosidade se encontra ativa (TU *et al.*, 2018).

Observa-se que a separação proposta por Ferziger *et al.* (2020) apresenta um aumento de custo computacional ao caminhar da primeira para a quarta abordagem, a primeira não é considerada como CFD, a segunda se utiliza de simplificações quanto ao número de dimensões, a terceira já envolve métodos numéricos de forma mais complexas, e a quarta é focada em tentar representar em maior plenitude o fenômeno. Dessas, a terceira abordagem contempla a metodologia implementada no REEF3D, em específico o método de RANS, descrito no item a seguir.

Um ponto a se destacar acerca dos métodos contemplados nas abordagens três e quatro refere-se à separação das Equações de NS em comportamento médio com componente flutuante. O método do DNS resolve as equações de NS em sua forma completa, portanto tratam das escalas finas e grosseiras, no RANS todas as escalas de turbulência são modeladas, enquanto no LES, os vórtices de larga escala são resolvidos, enquanto os menores são modelados.

### **3.3.1 *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS)**

Tendo em mente reduzir a complexidade da simulação, em conjunto com os custos computacionais, uma das abordagens existentes é conhecida como RANS. Segundo Rodi *et al.* (2013), RANS remete-se a utilização de métodos estatísticos para representar de forma média as flutuações turbulentas, e com isso resolver as equações governantes num fluxo médio. Como o procedimento implica em não se ter todas as escalas de turbulência sendo computadas, e se utiliza de modelos estatísticos, é razoável que o modelo utilizado seja um fator importante, e que erros no mesmo irão corromper a solução (ASTEIN, 2007).

Rodi *et al.* (2013) comenta uma desvantagem dos modelos RANS que mesmo ao serem mais econômicos que os LES e DNS, eles sofrem de generalização limitada e com isso dificuldade de se adaptar a geometrias mais particulares e seus campos de velocidades conforme encontrados em casos de aplicações hidráulicas e em estudos ambientais, especialmente quando se tem estruturas de larga escala com um papel dominante.

A metodologia para se derivar das Equações de NS as equações RANS é pela decomposição de Reynolds. Por sua vez, tal processo funciona pela separação do fluxo variável ( $u$ ) em duas componentes, uma média ( $U$ ) e uma flutuante ( $u'$ ). Ao tomar como exemplo a velocidade, se tem algo como:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = U_i(\mathbf{x}, t) + u'_i(\mathbf{x}, t) \quad (33)$$

O mesmo é proposto para o termo de pressão:

$$p_i(\mathbf{x}, t) = P_i(\mathbf{x}, t) + p'_i(\mathbf{x}, t) \quad (34)$$

Ao aplicar essas definições nas equações de NS, obtém-se:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u'_j u'_i} \right) + g_i \quad (35)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (36)$$

A única diferença pela equação tradicional de NS para essa forma média é a aparência do termo  $\overline{u'_j u'_i}$ . Esse termo representa a taxa de transferência de momento devido a turbulência, e o grande problema de se lidar é como encontrar um valor para esse termo, e assim fechar o sistema.

O termo completo,  $-\overline{u'_j u'_i}$ , é conhecido como tensor de estresse de Reynolds. Como o tensor é simétrico, ele produz seis (06) quantidades desconhecidas, somadas as outras quatro (04), pressão e as três componentes da velocidade, configuram dessa forma dez (10) valores desconhecidos, porém somente se tem disponível quatro (04) equações, isso significa que o sistema não se encontra fechado, e dessa forma requer um modelo para representar os fluxos turbulentos.

Dentre as possibilidades de modelos de fluxos turbulentos, tem-se Modelos de Viscosidade de *Eddy*, que tem a característica de adotar a aproximação de Boussinesq (1877), para escrever:

$$\overline{u'_j u'_i} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k - \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (37)$$

Onde  $\delta_{ij}$  é o delta de Kronecker,  $k$  é um parâmetro de turbulência. A chave para aplicar os diferentes tipos de modelo desse grupo é o termo  $\nu_t$ , que é alterado caso a caso. Será discutido apenas um dos tipos dos Modelos de Viscosidade de *Eddy*, os Modelos de Duas Equações.

### 3.3.1.1 Modelos de Duas Equações

Os Modelos de Duas Equações, como o próprio nome indica, vem a adicionar duas equações de transporte para quantificar o efeito da turbulência. Os modelos mais comuns são os  $k - \omega$ , e  $k - \epsilon$ .

Para o caso do modelo  $k - \omega$ ,  $v_t$  é expresso segundo:

$$v_t = c_\mu \frac{k}{\omega} \quad (38)$$

Onde o parâmetro  $k$  representa a energia cinética turbulenta, e o  $\omega$  a dissipação turbulenta específica. O termo  $k$  é encontrado por uma equação de transporte acoplada às equações de RANS:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \nu + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2v_t |S_{ij}|^2 - k\omega \quad (39)$$

E para o termo  $\omega$ , se tem a equação de transporte:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \nu + \frac{v_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + 2c_\mu c_{\omega 1} |S_{ij}|^2 - c_{\omega 2} \omega^2 \quad (40)$$

Os coeficientes têm os valores de  $c_\mu = 0,09$ ,  $c_{\omega 1} = 5/9$ ,  $c_{\omega 2} = 5/6$ ,  $\sigma_k = \sigma_\omega = 2$ , segundo Wilcox (2006).

O modelo  $k - \epsilon$  é estruturado de forma semelhante ao anterior, a diferença se encontra nos parâmetros, que no caso é utilizado a taxa de dissipação da turbulência ( $\epsilon$ ). O tipo de modelo  $k - \epsilon$  considerado como padrão remete a Launder e Spalding (1974), nesse caso,  $v_t$  é expresso como:

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (41)$$

Escreve-se a equação para  $k$  como:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \nu + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2v_t |S_{ij}|^2 - \epsilon \quad (42)$$

A Equação para  $\epsilon$ , por sua vez tem a forma de:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \nu + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + 2c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon^2}{k} |S_{ij}|^2 - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (43)$$

Os coeficientes  $c_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$ ,  $c_{\epsilon 1}$  e  $c_{\epsilon 2}$  são definidos em Launder e Spalding (1974).

O REEF3D conta com a implementação dos métodos  $k - \omega$  e  $k - \epsilon$ , entretanto nas simulações realizadas adotou-se somente o método  $k - \epsilon$ .

### 3.4 MOVIMENTAÇÃO DE MALHA

Um desafio adicional na simulação de Transporte de Sedimentos é a identificação dos efeitos na interface entre o fluido e o leito de sedimentos. Esse tipo de problema remete a situações de um ou mais fluidos interagindo entre si, no caso geral, como água e ar, e são particularmente desafiadores devido à natureza da fronteira móvel, onde se conhece somente a posição inicial do sistema, que vem a ser atualizado conforme avançam a solução (FERZIGER *et al*, 2020).

No caso de transporte de sedimentos, tem-se um foco no comportamento da fase sólida, seja ela composta pelo próprio fundo sendo mobilizado, ou como material suspenso na coluna d'água. Isso requer um arcabouço especial que permita a atualização da interface entre as fases líquida e sólida com base nas condições da simulação

As técnicas para estudar fenômenos multifásicos com movimentação de malha são divididas em duas abordagens a partir da interpretação do fenômeno: Lagrangeana e Euleriana.

Huerta (2006) descreve a abordagem Lagrangeana como o acompanhamento das partículas do *continuum* em deslocamento, criando uma malha que acompanha o campo de fluxo presente e garantindo que cada nó da malha esteja permanentemente conectado ao seu ponto material. Contudo, essa abordagem enfrenta riscos de distorção dos algoritmos quando ocorrem grandes deformações, como vórtices em fluidos. Já a abordagem Euleriana examina o fluxo em uma parte fixa do espaço, onde a malha de elementos é fixa, enquanto o *continuum* se move e se deforma em relação à malha computacional.

Tezduyar (2006), vem a dividir os métodos em relação ao tratamento da parcela sólida, entre Rastreamento de Interface e Captura de Interface, respectivamente, Lagrangeanos e Eulerianos. Esse trabalho foi desenvolvido por um método de Captura de Interface, em específico o Método *Level-set*.

Os métodos de Captura de Interface funcionam por utilizar uma função auxiliar que venha a determinar a posição da fronteira entre os fluidos. Essa função representa uma grandeza escalar ( $\phi$ ), e assim ser representada por uma Equação de Transporte Advectivo. A desvantagem desses métodos em parte se encontra na necessidade de se resolver mais uma equação.

#### 3.4.1 Curvas de nível (*level-set*)

O método do *level-set*, ou curva de nível, foi aplicado aos estudos de superfície livre pela primeira vez por Osher e Sethian (1988). Esse método adota uma função de marcação para estabelecer a distância de pontos da malha até a fronteira entre os fluidos. A fronteira por sua

vez é caracterizada como a curva de nível 0 ( $\phi = 0$ ), e a função assume valores positivos ou negativos, dependendo do fluido que está transportando. Apresenta-se na Figura 5 a uma imagem da função de marcação aplicada em uma interface.

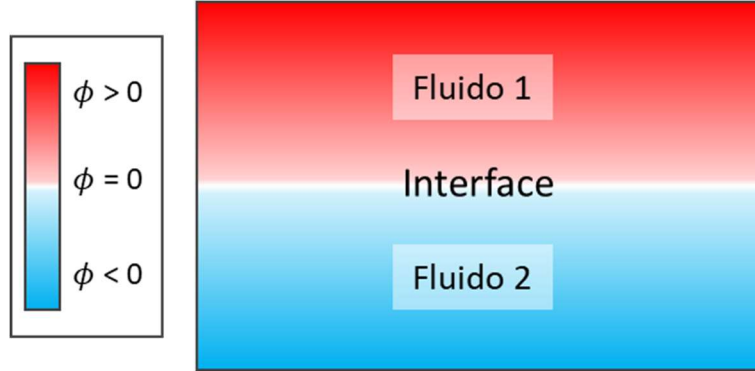


Figura 5: Função de marcação para o método de curvas de nível.

A Figura 5 representa que as fases se alteram devido a mudança de sinal da função de marcação ( $\phi$ ), que é representado como:

$$\phi(x, t) \begin{cases} > 0, & x \in \text{Fluido 1} \\ = 0, & x \in \text{Interface} \\ < 0, & x \in \text{Fluido 2} \end{cases} \quad (44)$$

Dessa forma, entende-se que para valores positivos da função marcação ( $\phi$ ), a área fará parte do Fluido 1, e para valores negativos para o Fluido 2. A aplicação dessa função em todo o domínio mantém um risco de transições abruptas devido a interface possuir espessura nula (OSHER e SETHIAN, 1988), para aliviar esse tipo de problema, atribui-se uma transição na fronteira de espessura  $2\epsilon$ , com  $\epsilon$  proporcional a discretização da malha (FLEIT, 2016). As propriedades dos fluidos necessárias para a equação de escoamento são interpoladas por meio das seguintes equações:

$$\rho(\phi) = \rho_1 H(\phi) + (1 - H(\phi))\rho_2 \quad (45)$$

$$\mu(\phi) = \mu_1 H(\phi) + (1 - H(\phi))\mu_2 \quad (46)$$

O termo  $H(\phi)$  remete a função de Heaveside e é descrita como:

$$H(\phi) = \begin{cases} 0, & \phi < -\epsilon \\ \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\phi}{\epsilon} + \frac{1}{\pi} \text{sen} \left( \frac{\pi}{\epsilon} \right) \right], & |\phi| \leq \epsilon \\ 1, & \phi > \epsilon \end{cases} \quad (47)$$

Onde nesse caso,  $\epsilon$  é a espessura da interface. Um problema relacionado a aplicação do método está relacionado a sua característica principal, ao permitir que os valores de  $\phi$  evoluam com o transporte, eles eventualmente se tornam descaracterizados, e com isso necessita-se que se reinicie a função em relação a fronteira. O REEF3D adota uma abordagem a partir de Equações Diferenciais Parciais (SUSSMAN, 1994):

$$\frac{d\phi}{d\tau} + S(\phi) \left( \left| \frac{d\phi}{dx_i} \right| - 1 \right) = 0 \quad (48)$$

Onde a função de suavização  $S(\phi)$  é dado por (PENG, 1999):

$$S(\phi) = \frac{\phi}{\sqrt{\phi^2 + \left| \frac{d\phi}{dx_i} \right|^2 (\Delta x)^2}} \quad (49)$$

O procedimento consiste em resolver a equação  $\frac{d\phi}{d\tau}$  utilizando passo temporal artificial  $d\tau$ , até que seja alcançado o estado estacionário. A função  $S(\phi)$  retorna o valor de 0 até a interface, para em seguida reclassificar o domínio segundo a função *level-set*.

### 3.5 SAND-SLIDE

A implementação do algoritmo de Redução de Arraste de Fundo proporciona uma intensificação dos efeitos erosivos considerando a declividade das células do material de fundo. Conforme indicado por Bihs *et al.* (2011), deve-se ter precaução ao adotar algoritmos desse tipo pois há a possibilidade de se transcórrem processos erosivos exagerados. Digamos que se deseja analisar o efeito sob uma célula isolada que em um determinado passo de tempo sofre processo erosivos, no passo de tempo sucessivo, devido ao algoritmo de redução, se calcularia um ajuste no arrasto de fundo em função da variação da declividade, caso não se tenha algum tipo de limitador, esse efeito poderia continuar a ocorrer em excesso.

O presente estudo adota um algoritmo de limitador dos processos erosivos conforme em Afzal (2013) e Fleit (2016), que remetem ao desenvolvido por Burkow (2010). Caso seja identificado que alguma célula apresentou declividade de fundo maior que o ângulo de repouso ( $\varphi$ ) do material, realiza-se uma distribuição do volume de sedimentos para as 08 (oito) células adjacentes. As células laterais e longitudinais recebem um acréscimo/redução de  $dh/24$ , sendo  $dh$  a diferença de altura entre as células. E as células diagonais são alteradas pelo valor  $dh/48$ . O processo é continuado até a declividade seja idêntica ao ângulo de repouso. Essa implementação proporciona uma suavização do processo erosivo.

### 3.6 DECOMPOSIÇÃO DO PASSO DE TEMPO

Um último aspecto a ser considerado no software REEF3D remete a forma como se desenvolve o desacoplamento entre a resolução das equações de fluido para as equações que tratam do sedimento suspenso e de fundo. As equações de NS possuem um alto grau de complexidade numérica, e os resultados encontrados representam a parcela hidrodinâmica do

sistema. O movimento de sedimentos e a resultante alteração morfológica do fundo (devido a erosão e deposição) são extremamente sensíveis às condições do fluido, e essas alterações também possuem efeitos consideráveis retroalimentares na hidrodinâmica (Afzal, 2013).

Então seria mais interessante que as equações fossem resolvidas para o mesmo passo de tempo, resultando em um método totalmente acoplado, porém essa abordagem implicaria num custo computacional muito alto. Então, as alternativas são métodos semi-desacoplados ou totalmente desacoplados.

Os métodos semi-desacoplados assumem que a vazão e o transporte de sedimentos suspensos possuem a mesma escala temporal enquanto a alteração do fundo e distribuição de resistência de fundo possuem passos de tempo maiores que os adotados para a vazão e o transporte de sedimentos (Afzal, 2013). O método resolve inicialmente as equações hidrodinâmicas e as equações de transporte suspenso, para em seguida a partir dos novos campos de fluido calcular a variação do transporte de fundo usando um passo de tempo maior.

O REEF3D adota um método totalmente desacoplado, com um passo de tempo diferenciado e de maior escala para o transporte suspenso, do transporte de fundo e na alteração morfológica.

## 4 RESULTADOS

Serão apresentados neste capítulo os resultados encontrados nas simulações. Serão apresentadas três simulações, sendo duas de benchmark, baseadas em experimentos, e uma em cenário fictício. Todas as simulações foram rodadas em paralelo num computador de gabinete com processador AMD Ryzen 5 3600 de 06 cores. A convergência de todos os resultados analisados foi aceita por identificar que após os instantes iniciais, teve-se uma estabilidade relativa dos passos de tempo.

### 4.1 EROÇÃO EM PILAR CILÍNDRICO

O primeiro caso estudado é o de erosão num pilar cilíndrico, também conhecido como pilar unitário, tomando a montagem do experimento conduzido na *Technical University Darmstadt* (Link, 2006) conforme simulado numericamente em Afzal (2013) com o REEF3D.

Estudos de avaliação de estabilidade de estruturas, em específicos pilares de pontes por exemplo, são alvos de investigações comumente desenvolvidas no ramo da engenharia hidráulica. Pilares submersos estão sujeitos a forças excessivas referentes às vazões extremas. As vazões contribuem para a condição de instabilidade da estrutura ao provocar erosões nas fundações.

O fenômeno consiste numa situação na qual a passagem do fluido pela estrutura isolada, em sua parcela frontal no contato com a estrutura, desencadeia ao fluido se movimentar em direção ao fundo provocando a formação de turbilhões em sua parcela mais profunda (YINCAN, 2017) por fim, desencadeia-se a escavação do fundo no entorno do pilar. Segundo Julien (2010), a erosão nesses casos é causada por vórtices gerados na base do cilindro, em inglês eles são conhecidos como “*horseshoe vortex*”, ou ferraduras, que por sua vez são induzidos pelos fluxos secundários relacionados ao escoamento. Na parte jusante da estrutura, ocorre a separação do fluxo devido ao gradiente de velocidades provocando a liberação de vórtices induzidos (“*Wake vortex*”) continuamente em ambos os lados do pilar, que vão se dissipando (YINCAN, 2017). Um esquema representativo do fenômeno está ilustrado na Figura 6.

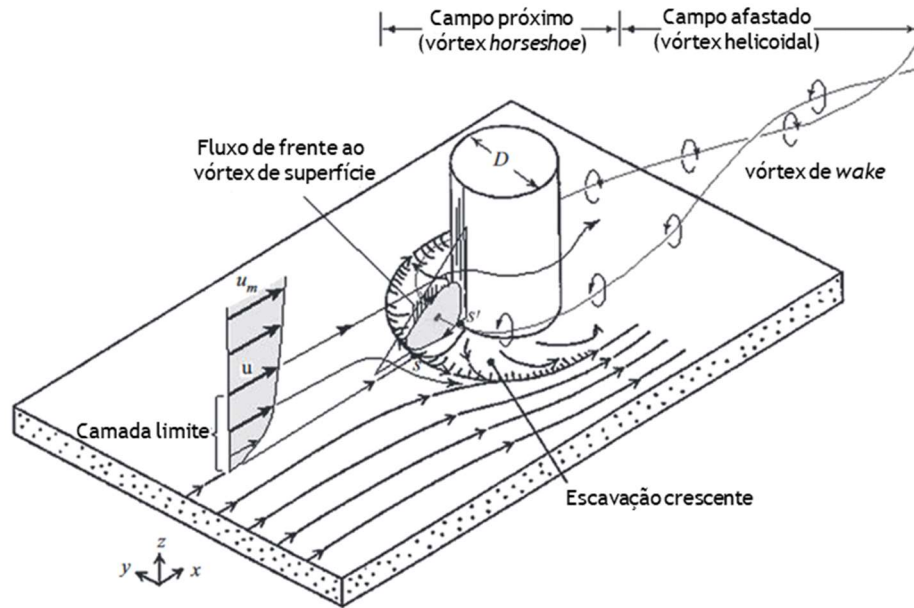


Figura 6: Diagrama esquemático do fluxo de água e de escavações entorno de um pilar unitário, adaptado de Yincan *et al.* (2017).

O experimento, conforme estudado em Afzal (2013), foi originalmente realizado num canal retangular, com 37,0 m de comprimento, 2,0 m de largura e 1,0 m de altura. As paredes laterais eram de acrílico. O obstáculo também era composto de acrílico e foi instalado ao centro do canal, 16,0 m a partir da entrada. O píer contou com 0,2 m de diâmetro. Foi preenchido o trecho 1,5 m antes e depois do obstáculo com sedimentos, o resto do canal era de concreto. O sedimento de fundo era composto por areia natural com diâmetro médio ( $d_{50}$ ) de 0,97 mm (0,00097 m), com  $2,65 \text{ T/m}^3$  de densidade e ângulo de repouso de 29 graus com o ar.

O experimento numérico foi uma adaptação do previamente descrito, com 4,0 m de comprimento, 2,0 m de largura, e com 0,8 m de altura com o pilar localizado ao centro. A camada de sedimentos possui 0,3 m de espessura, sobreposto a essa, tem-se 0,3 m de coluna d'água. Adota-se na condição de contorno de montante um valor de vazão constante com nível d'água fixo, respectivamente de  $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$  e 0,60 m, e não se aplicou controle no nível nem no fluxo para a saída do modelo. Observa-se na Figura 7 um esquema do modelo computacional utilizado.

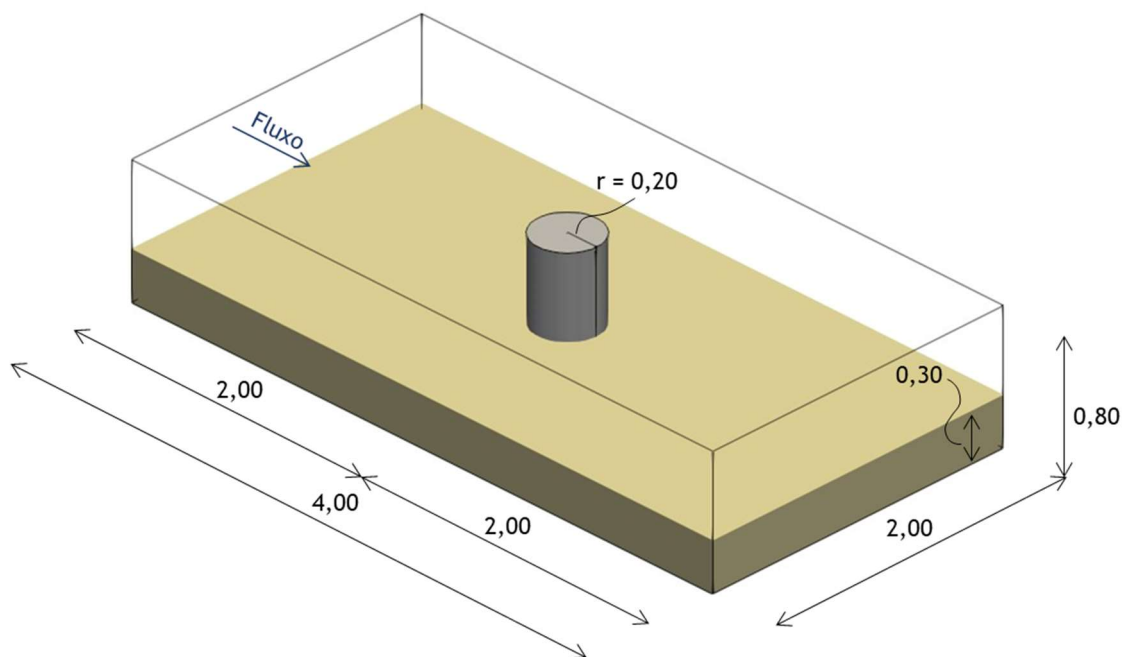


Figura 7: Esquema do cenário simulado para o estudo de erosão em pilar cilíndrico unitário.

O experimento de Afzal (2013) simulou com uma vazão constante de  $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ , em regime uniforme, durante o período de simulação de 75.600 segundos, o presente estudo se limitou aos primeiros 7.560 segundos.

Todos os parâmetros adotados no estudo se encontram consolidados na Tabela 3. Ressalta-se que consta no Apêndice do presente documento os scripts configurados para as simulações apresentadas.

Tabela 3: Parâmetros adotados na simulação numérica da erosão em Pilar Unitário.

<b>Parâmetros Geométricos</b>		
Tipo de seção	-	Retangular
Comprimento	m	4,00
Largura	m	2,00
Altura	m	0,80
<b>Condições de Contorno</b>		
Nível d'água de entrada	m	0,60
Nível d'água de saída	m	Livre
Vazão de entrada	$\text{m}^3/\text{s}$	0,18
Vazão de saída	$\text{m}^3/\text{s}$	Livre
<b>Parâmetros Sedimentos</b>		
Diâmetro médio	m	0,00097
Densidade do sedimento	$\text{kg}/\text{m}^3$	2,650
Velocidade de queda	m/s	0,155
Porosidade	-	0,75
Parâmetro de Shields	-	0,0125
Espessura da camada de sedimentos	m	0,30
Ângulo de repouso	grau	$29,0^\circ$

Foram simulados dois cenários com diferentes discretizações espaciais, com espaçamento na direção  $x$  ( $\Delta x$ ) de 0,030 m e 0,025 m. A partir dos resultados, compara-se as escavações máximas encontradas em todo o domínio comparados com os apresentados em Afzal (2013), como observa-se na Figura 8. Os resultados encontrados no presente estudo apresentaram um avanço mais intenso e maiores escavações que as apresentadas por Afzal (2013).

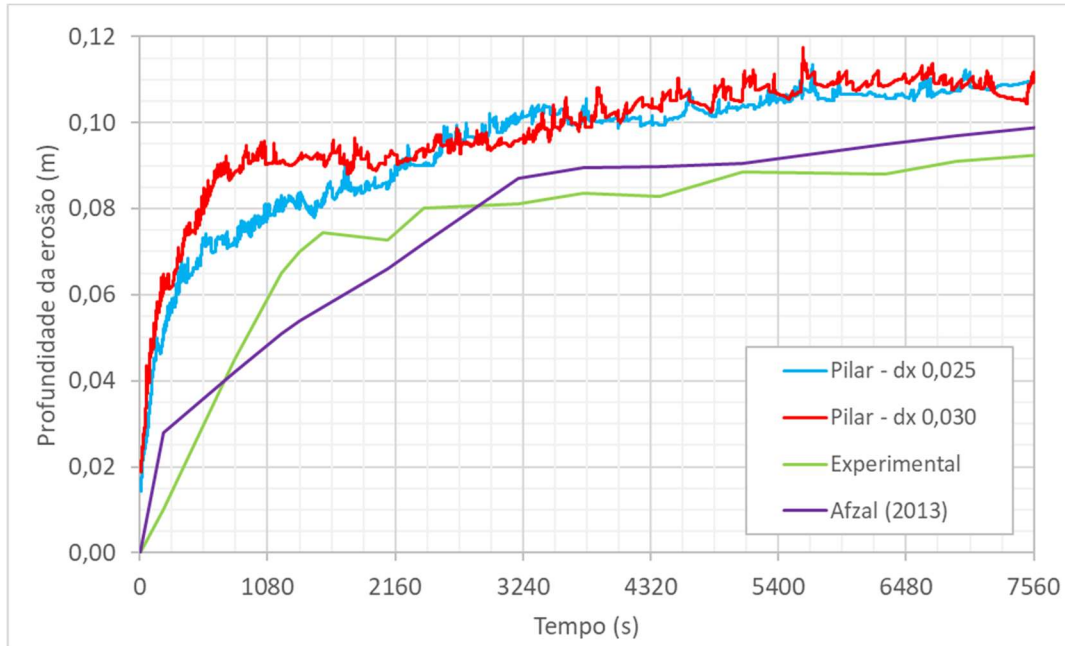


Figura 8: Comparação dos resultados encontrados com os de Afzal (2013)

Apresenta-se na Figura 9 cena em perspectiva isométrica da velocidade do fluido em termos de magnitude de velocidade, é possível observar, na parte inferior do modelo a camada de sedimentos correspondente ao fundo.

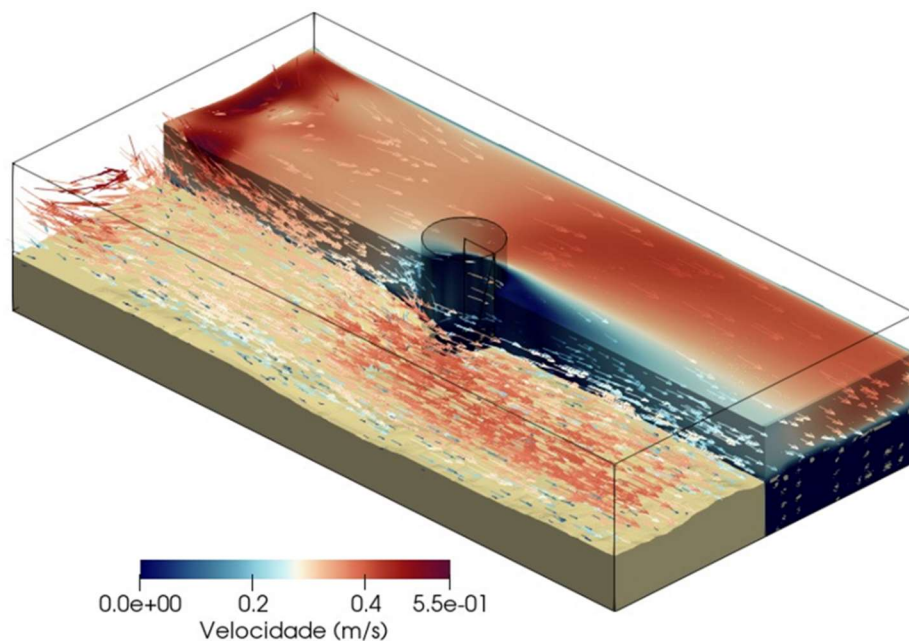


Figura 9: Magnitude de velocidades encontradas no fluido no último passo de tempo.

A cena também se encontra apresentada em sua vista superior e lateral na Figura 10.

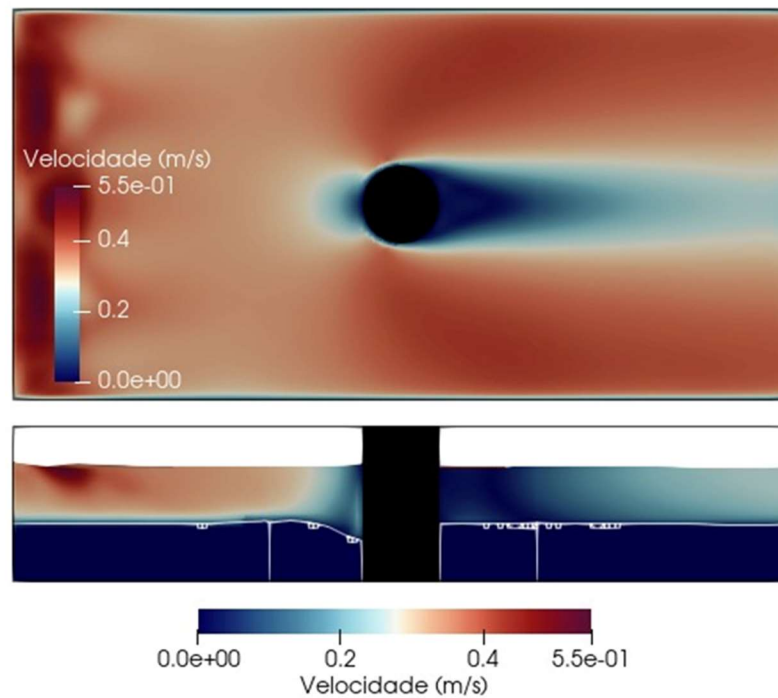


Figura 10: Distribuição da magnitude das velocidades encontradas no último instante simulado.

Em termos espaciais, identificou-se o comportamento esperado numa formação de cela (*horseshoe*), conforme diagrama apresentado na Figura 6. Formou-se uma zona com velocidades bem baixas chegando a estarem próximas de zero logo após o obstáculo e dois caminhos preferenciais de maiores velocidades nas laterais.

Apresenta-se na Figura 11 quatro momentos da simulação realizada, um instante inicial em 0 s, logo em seguida o passo de tempo de 2520s, 5040s e por fim 7560s. Em poucos segundos de simulação, já se identificou a formação da sela erodindo o pé de montante do pilar e a formação de duas áreas principais de deposição após o pilar. Com o avanço da simulação, identificou-se que a sela expandiu um pouco lateralmente e foi ocorrendo lentamente uma consolidação das áreas jusante, formando três sulcos erosivos, um bem ao centro do domínio e dois nas laterais, separados por duas áreas de deposição.

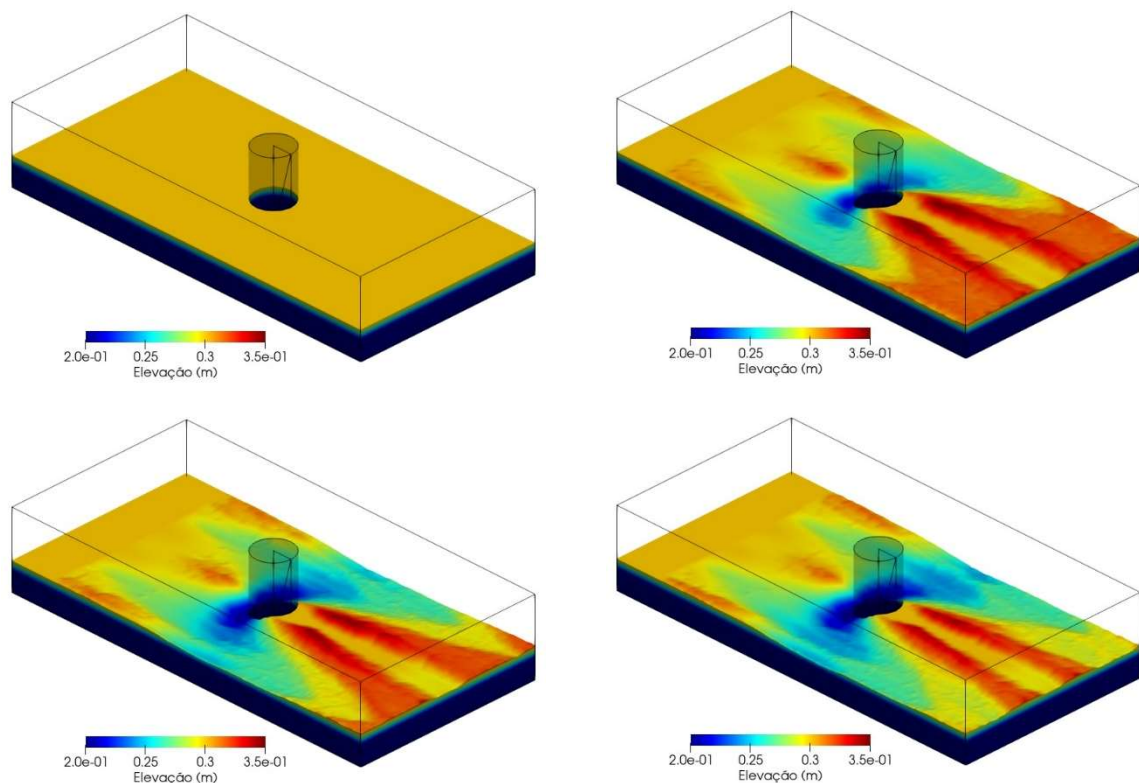


Figura 11: Evolução da topografia de fundo nos passos de tempo, da esquerda para direita e de cima para baixo, 0 s, 2520 s, 5040 s e 7560 s.

Foram gerados gráficos para todo o período simulado das elevações máximas e mínimas encontradas, tomando como referência do valor 0,0 ser referente a condição inicial, ou seja, a quantidade de deposição de material (maiores que 0,30 m) apresentará valores positivos no gráfico, e valores negativos (menores que 0,30 m) representa a erosão, como observa-se na Figura 12. Identifica-se que as principais alterações ocorreram nos primeiros 1000 segundos de simulação, tanto no aspecto erosivo quanto acerca da deposição de sólidos, alcançando rapidamente os máximos. Nos instantes seguintes tem-se um avanço das profundidades mínimas numa taxa mais lenta, e após os 5000 segundos uma redução nos valores máximos encontrados para a deposição. Ressalta-se que em ambos os cenários de discretização o comportamento é semelhante, porém a erosão avançou mais intensamente para uma malha com discretização mais grosseira que acabou convergindo ao mesmo resultado do cenário de discretização mais fina. O mesmo observa-se nos aspectos de deposição, com um avanço mais intenso, que veio a convergir para os mesmos valores em ambos os cenários.

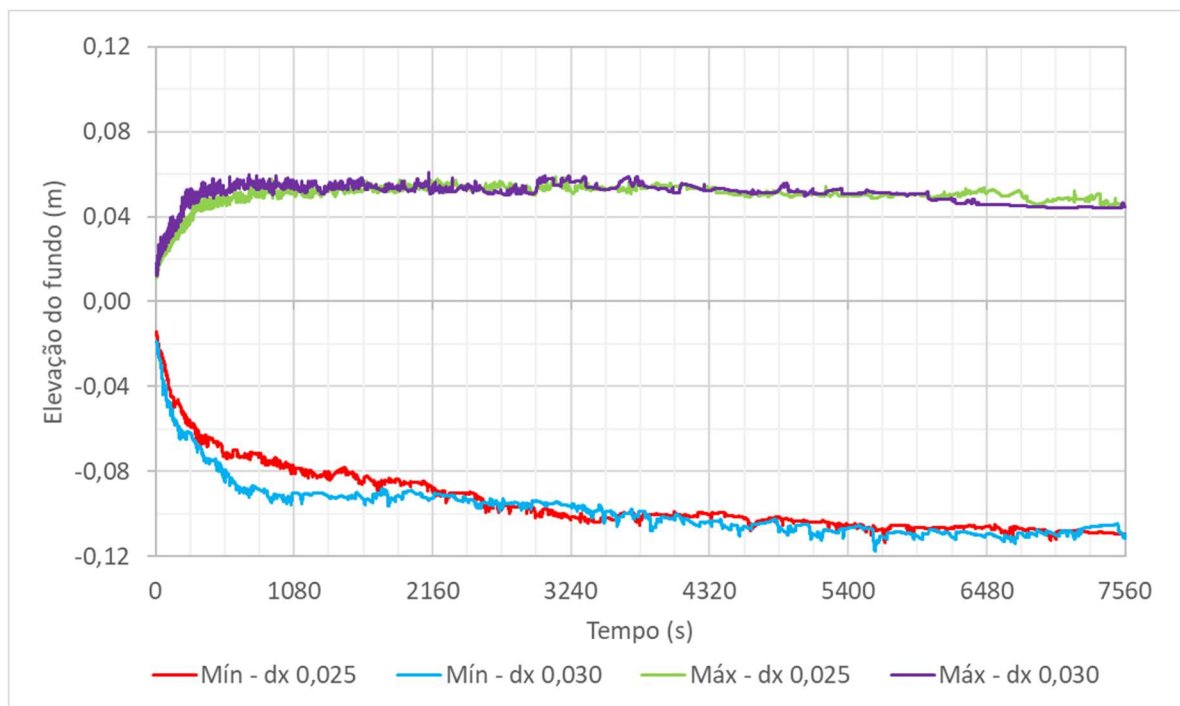


Figura 12: Variação da topografia de fundo em termos de mínimo e de máximo.

#### 4.2 EROSIÃO EM CANAL COM OBSTÁCULO

O segundo caso estudado é o de erosão em um cenário com um obstáculo hexaédrico, na lateral de um canal retangular, tomando a montagem do experimento conduzido na *Politecnico di Milano*, Dept., IIAR, Milan/IT (Malavasi, 2004) conforme discutido em Afzal (2013) adotando como ferramenta de modelagem o REEF3D.

O experimento foi desenvolvido inicialmente num canal retangular, com 15,0 m de comprimento e 0,6 m de largura. O canal foi preenchido com sedimentos naturais uniformes com diâmetro médio ( $d_{50}$ ) de 1,9 mm (0,0019 m). O obstáculo é um hexaedro localizado no centro do canal, colado em sua parede esquerda, com largura de 0,202 m e comprimento de 0,102 m.

O modelo numérico adotou um canal menos extenso, com 4,0 m, porém com as demais premissas semelhantes, com o fundo do canal sendo composto por sedimentos com  $d_{50}$  de 1,9 mm (0,0019 m), com o obstáculo com as mesmas dimensões do modelo físico e locado no mesmo lugar. A profundidade do nível d'água é de 0,095 m acima da camada de sedimentos, com velocidade média do fluido de 0,47 m/s. O canal conta com uma declividade longitudinal de 0,0012, o que segundo Afzal (2013) corresponde a um parâmetro de Shields de 0,03. A duração do experimento foi de 2,0 horas. Apresenta-se na Figura 13 um esquema com o arranjo geral do experimento.

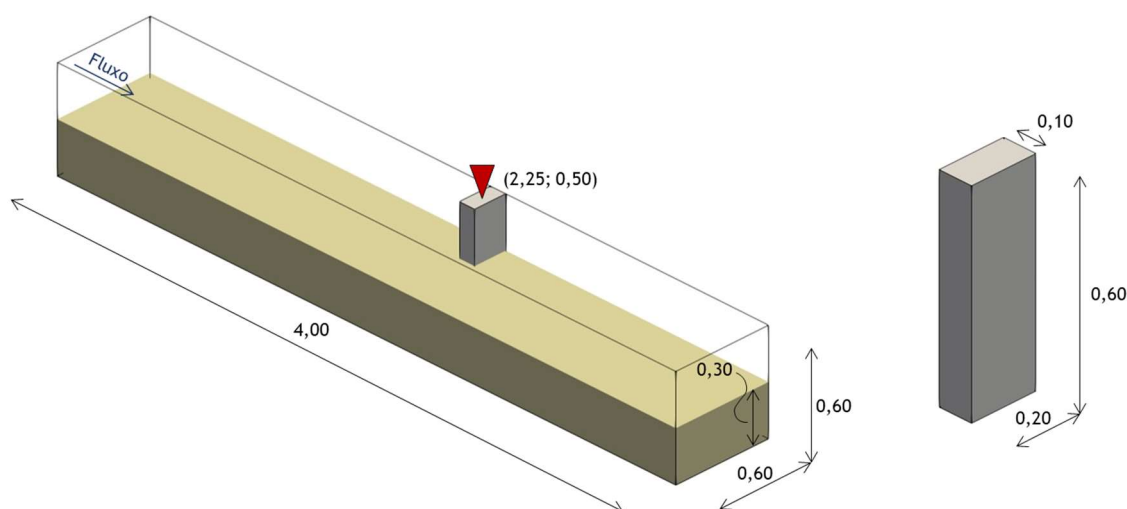


Figura 13: Esquema do cenário simulado para o estudo de erosão em canal com obstáculo.

O experimento de Afzal (2013) simulou o cenário praticando um controle no nível de entrada e na velocidade de entrada, com, respectivamente, 0,095 m e 0,47 m/s em regime uniforme durante o período de simulação de 7.560 segundos. A condição de saída foi estabelecida se mantendo fixo o nível e com fluxo variável durante a simulação.

Todos os parâmetros adotados no estudo se encontram consolidados na Tabela 4. Ressalta-se que consta no anexo do presente documento os scripts configurados para as simulações apresentadas.

Tabela 4: Parâmetros adotados na simulação numérica da erosão em Canal com Obstáculo.

<b>Parâmetros Geométricos</b>		
Tipo de seção	-	Retangular
Comprimento	m	4,00
Largura	m	0,60
Altura	m	0,60
<b>Condições de Contorno</b>		
Nível d'água de entrada	m	0,395 <sup>1</sup>
Nível d'água de saída	m	0,395
Vazão de entrada	m <sup>3</sup> /s	0,027 <sup>2</sup>
Vazão de saída	m <sup>3</sup> /s	Livre
<b>Parâmetros Sedimentos</b>		
Diâmetro médio	m	0,0019
Densidade do sedimento	kg/m <sup>3</sup>	2,650
Velocidade de queda	m/s	0,1742
Porosidade	-	0,75
Parâmetro de Shields	-	0,03
Espessura da camada de sedimentos	m	0,30

<sup>1</sup> Considera-se nesse caso o nível de água 0,095 m mais a profundidade do fundo de sedimentos, de 0,30 m.

<sup>2</sup> Vazão calculada a partir da área e da velocidade estabelecidos.

Ângulo de repouso grau 50,0°

Foram simulados dois cenários com diferentes discretizações espaciais, com dx de 0,030 e 0,025 m, porém apresenta-se inicialmente somente os resultados da discretização mais refinada. Os resultados encontrados para as profundidades máximas das erosões em todo o domínio comparados com os apresentados em Afzal (2013) se encontram na Figura 14.

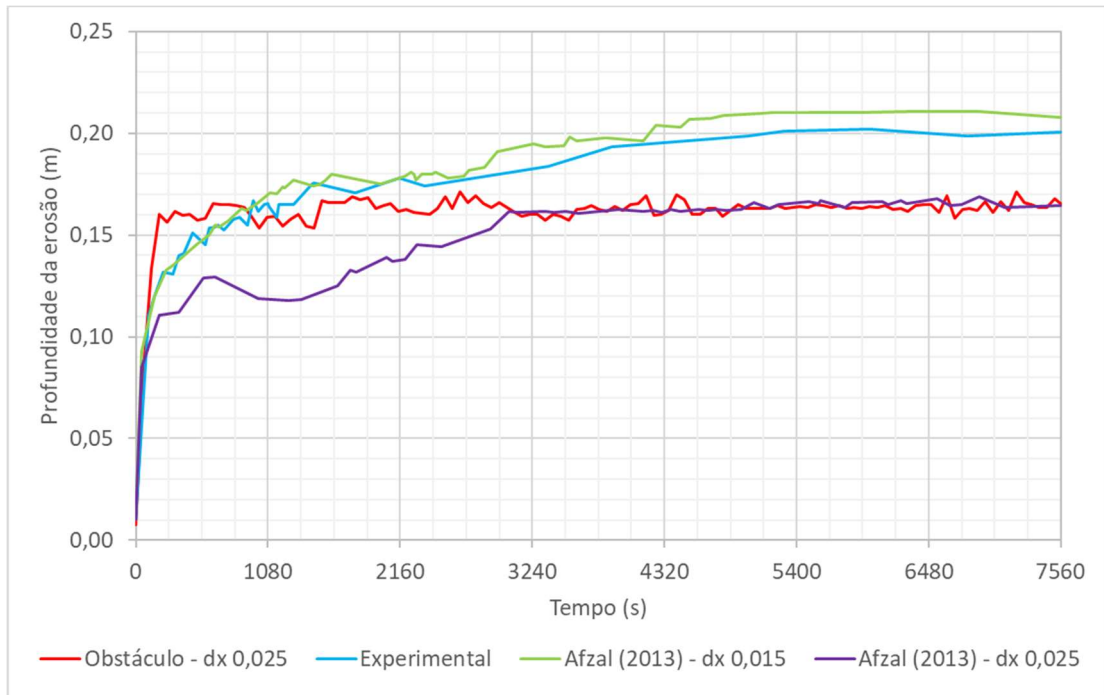


Figura 14: Comparação dos resultados encontrados com os de Afzal (2013)

Cabe destacar que os resultados apresentados na Figura 14 são semelhantes no cenário em que se tem a mesma discretização espacial ( $\Delta x$  de 0,025), mesmo identificando-se divergências no início das simulações. Contudo os resultados encontrados no estudo divergiram em torno de 0,05 m do valor máximo encontrado nos resultados experimentais e da simulação de Afzal (2013) com maior discretização espacial

Apresenta-se na Figura 15 os resultados em perspectiva isométrica da velocidade do fluido em termos de magnitude de velocidade.

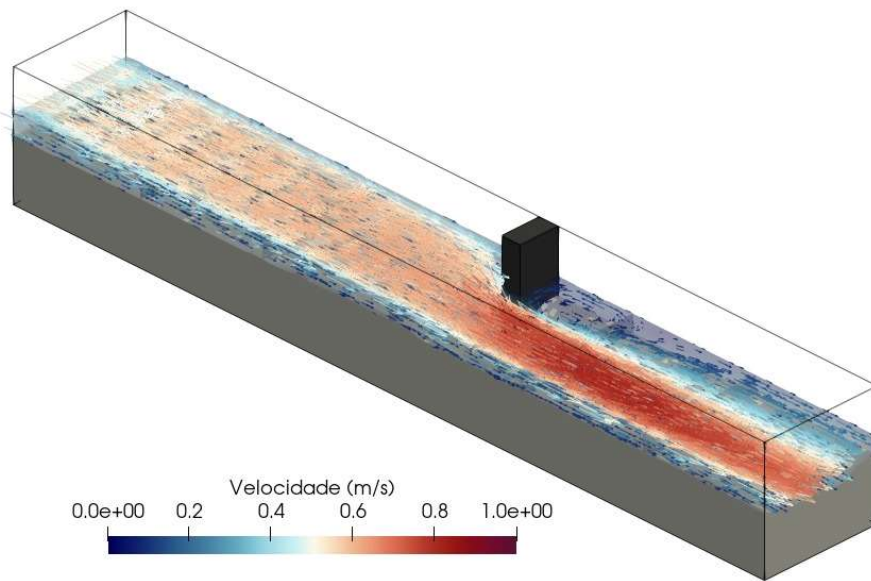


Figura 15: Magnitude de velocidades encontradas no fluido no último passo de tempo.

A cena também se encontra apresentada em sua vista superior na Figura 16.

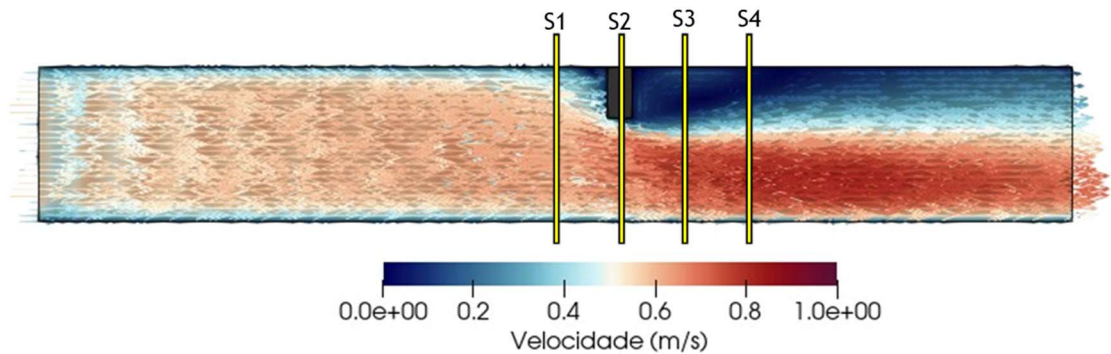


Figura 16: Distribuição da magnitude das velocidades encontradas no último instante simulado.

Observa-se na Figura 15 e na Figura 16 uma direção predominante de fluxo mais acelerado na lateral direita e, por outro lado, um redemoinho logo após o obstáculo na lateral esquerda, nessa região a magnitude de velocidade ficou próxima de zero com o fluxo em diversas direções.

A Figura 17 ilustra o caminho tomado pelas partículas de fluido nas proximidades do obstáculo em termos da magnitude de velocidade e da velocidade na direção vertical em perspectiva isométrica. Ressalta-se que as quatro seções transversais apresentadas na Figura 16 se encontram representadas na Figura 17.

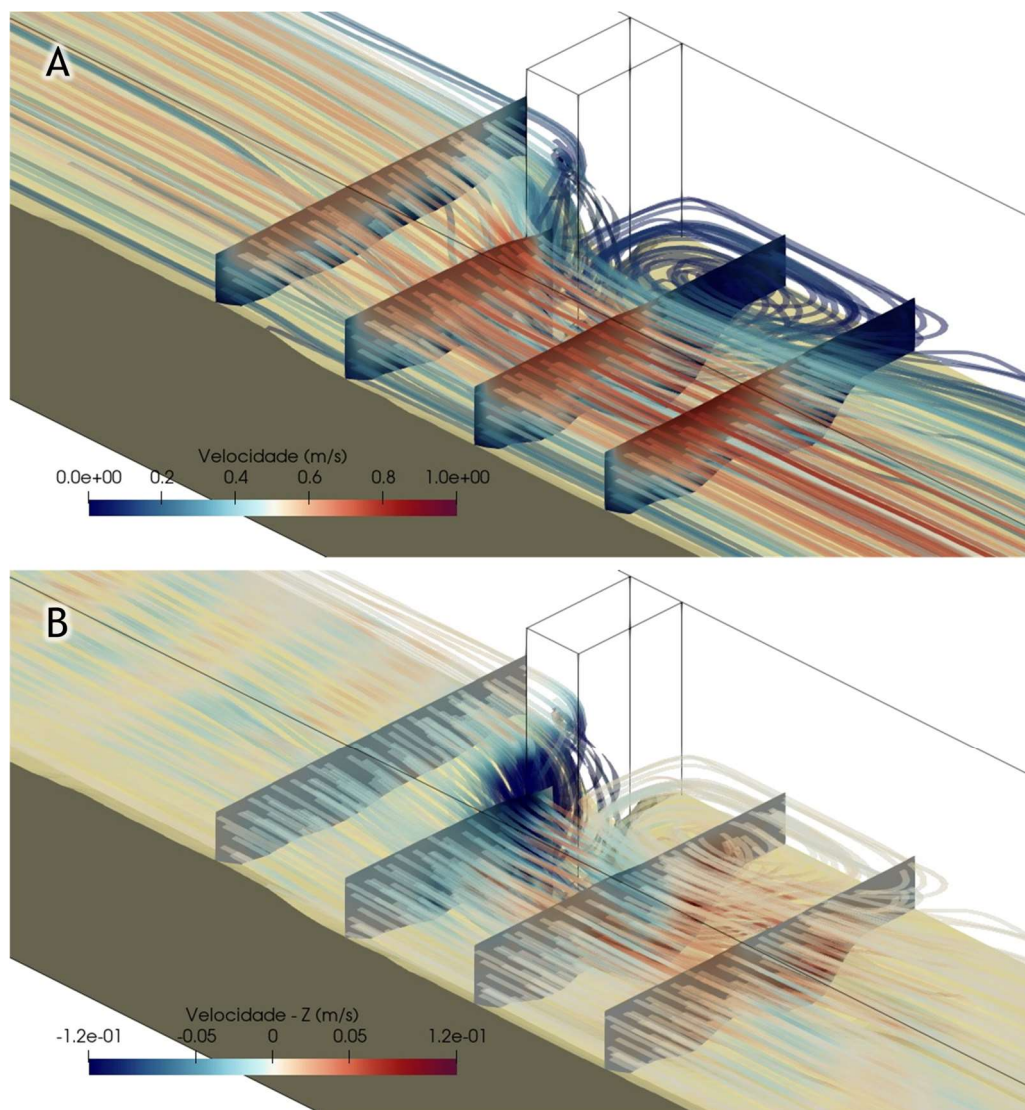


Figura 17: Linhas de fluido em perspectiva isométrica em termos de magnitude de velocidade e velocidade na direção vertical.

Com base no apresentado na Figura 17, observa-se que o fluido realiza um “mergulho” logo antes do obstáculo para em seguida se deslocar para a direita, o mergulho fica evidente ao analisar as velocidades direcionadas para baixo (Figura 17B), também cabe ressaltar que nos locais mais centrais, logo após o obstáculo e que contaram com maior perda de material tem-se velocidades direcionadas para cima. O afunilamento na lateral esquerda e o redemoinho na direita descritos anteriormente estão representados pela Figura 17A.

As seções são apresentadas em termos de magnitude e direção nas Figura 18 a Figura 21. Na primeira seção (Figura 18), anterior ao obstáculo, observa-se as velocidades mais distribuídas num padrão comum, com velocidades mais elevadas na superfície distante das paredes, porém, em termos da velocidade na direção vertical, identifica-se o começo do “mergulho”, indicando uma predominância das velocidades direcionadas para baixo.

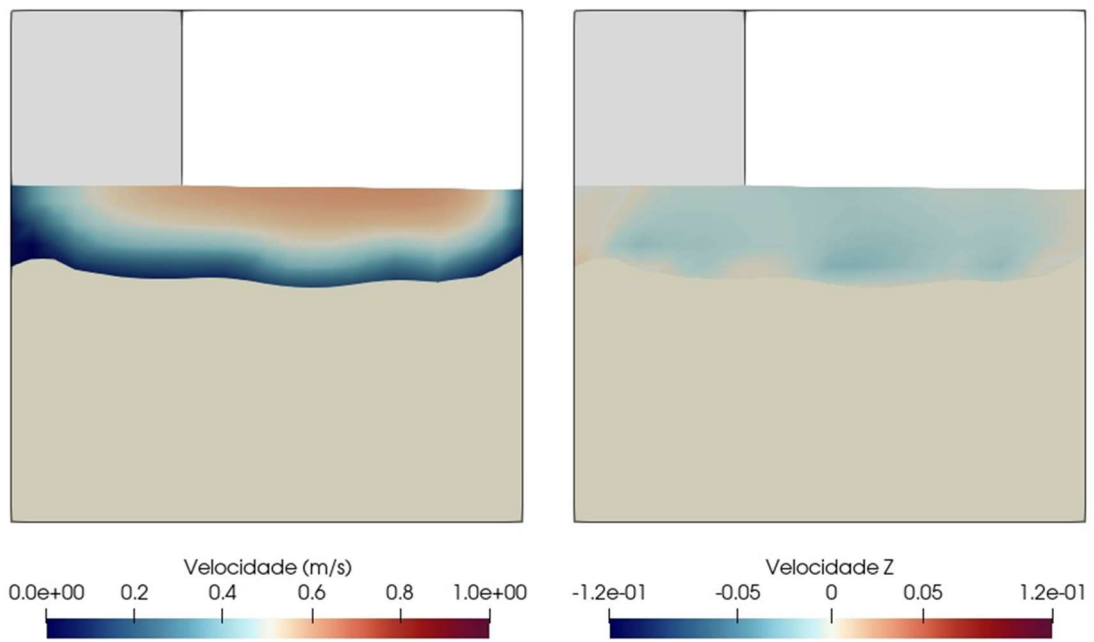


Figura 18: Seção S1 em termos de magnitude de velocidade e velocidade na direção o vertical.

A segunda seção já corta o obstáculo (Figura 19), dessa forma identifica-se velocidades mais elevadas na parcela direita, onde também ocorreu maior escavação do fundo. Em termos da direção, tem-se um comportamento significativo da parcela fluida com maior velocidade para baixo, enquanto a parcela do fundo se espalha para as laterais, principalmente para a direita da seção.

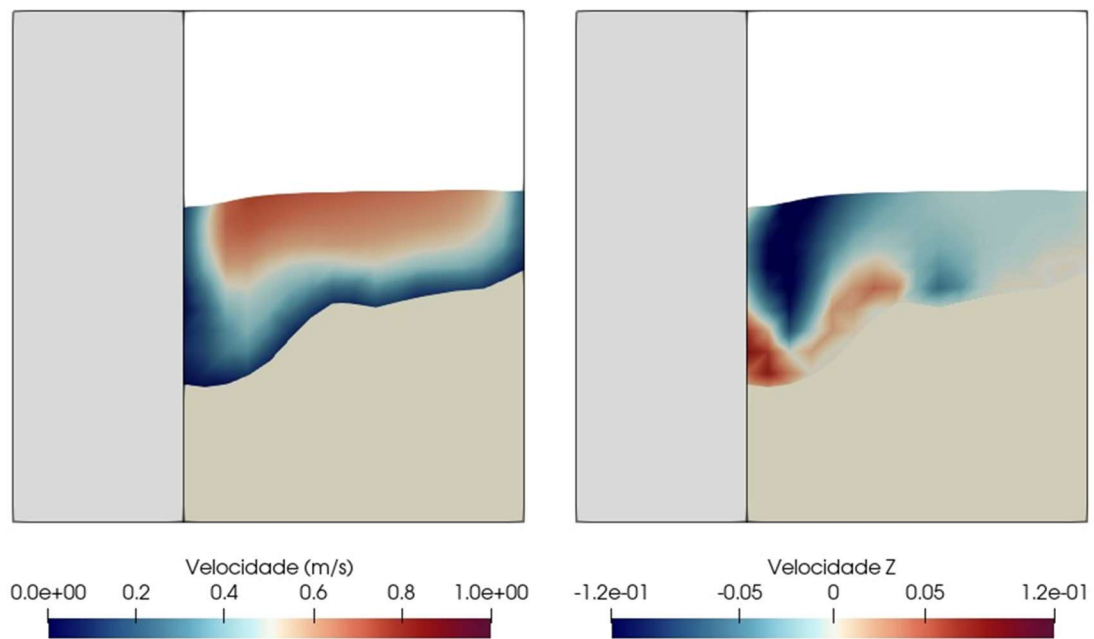


Figura 19: Seção S2 em termos de magnitude de velocidade e velocidade na direção o vertical.

A terceira seção (Figura 20) representa o comportamento à jusante do obstáculo, com a manutenção de um fluxo preferencial mais intenso na lateral direita, ressalta-se que conforme observado nas Figura 16 e na Figura 17, o redemoinho formado pelo deslocamento do fluido fica evidente na lateral esquerda, pela velocidade se encontrar próxima de zero. Destaca-se também um comportamento de subida das águas que se encontram abaixo no mesmo local, porém mais intenso que na segunda seção.

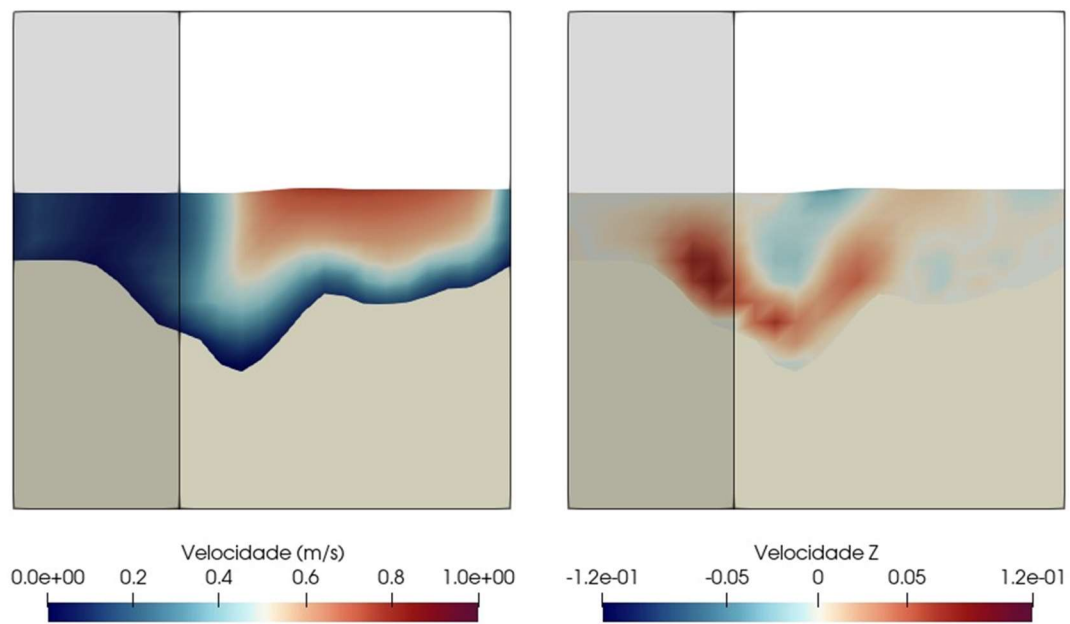


Figura 20: Seção S3 em termos de magnitude de velocidade e velocidade na direção o vertical.

A quarta seção (Figura 21) apresenta um enfraquecimento do redemoinho, associado a uma aceleração na lateral direita, e também identifica-se um enfraquecimento das velocidades na direção vertical, o que indica que o comportamento do fluido está retornando à condição normal.

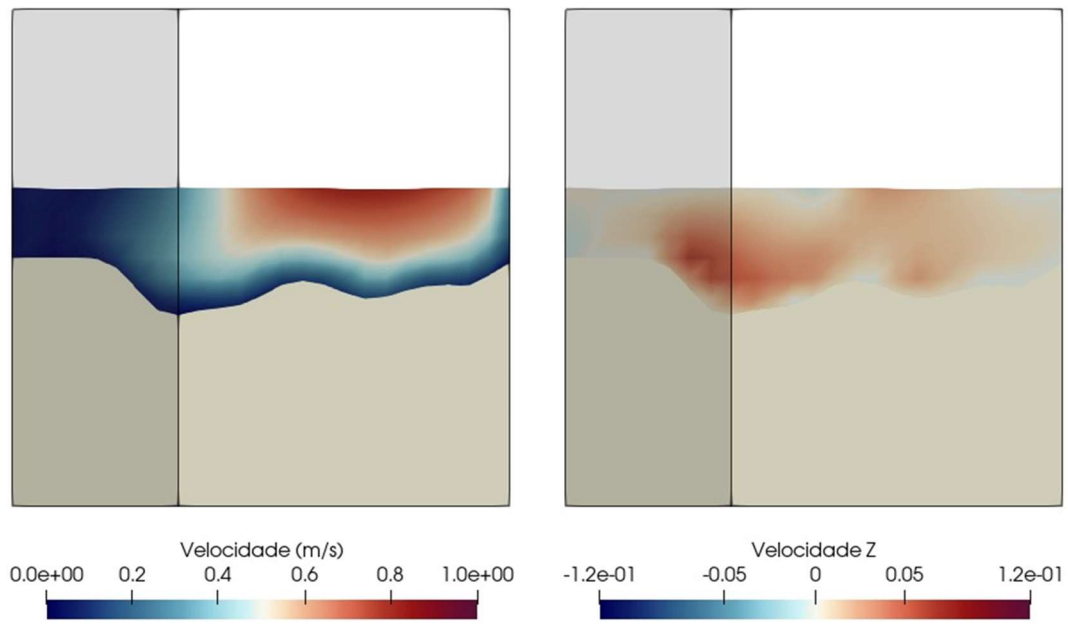


Figura 21: Seção S4 em termos de magnitude de velocidade e velocidade na direção o vertical.

Apresenta-se na Figura 22 quatro momentos da simulação realizada, nos instantes 0s, 2520s, 5040s e 7560s. Logo nos instantes iniciais já se tem a escavação do pé de montante e da lateral do obstáculo, esse comportamento se intensifica nos demais instantes, principalmente com um avanço da escavação em direção jusante paralelo ao fluido.

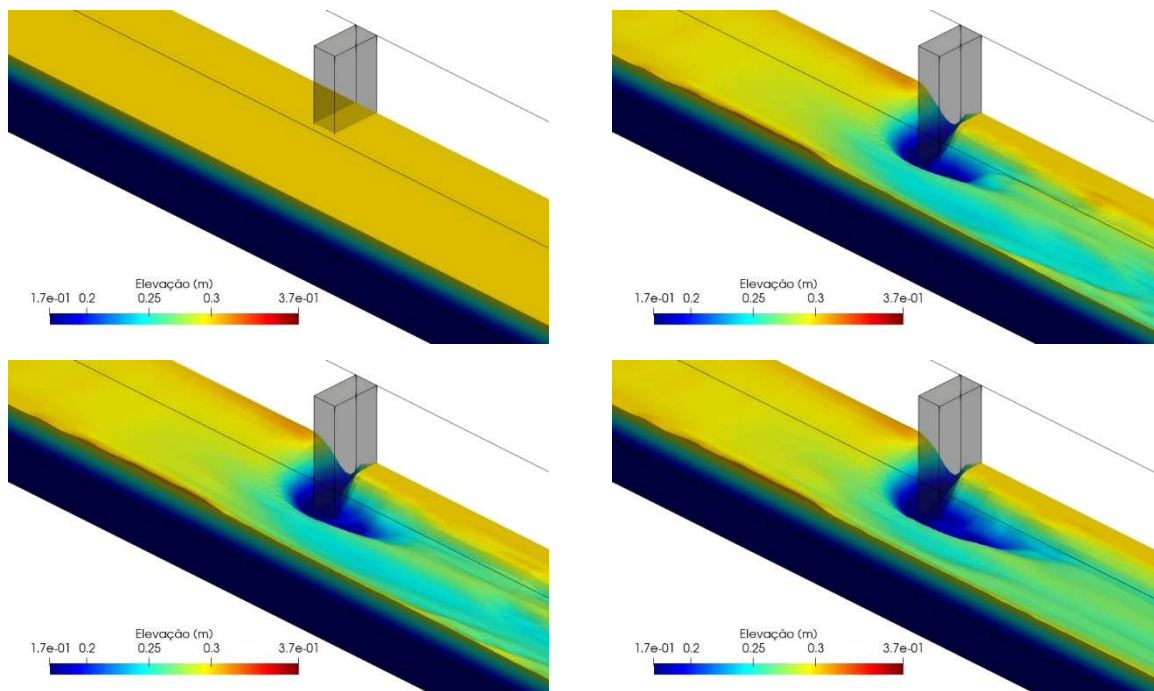


Figura 22: Evolução da topografia de fundo nos passos te tempo, da esquerda pra direita e de cima para baixo, 0 s, 2520 s, 5040 s e 7560 s.

A Figura 23 apresenta as variações em termos das elevações máximas e mínimas encontradas para todo o período simulado. As principais alterações ocorreram nos primeiros 270 segundos, com um rápido avanço até as elevações finais encontradas, com elevações máximas próximas de 0,32 m (2 cm de deposição) e mínimas 0,13 m (17 cm de erosão). Ressalta-se que o modelo mais refinado apresentou menos oscilações no tempo, com um comportamento mais estável.

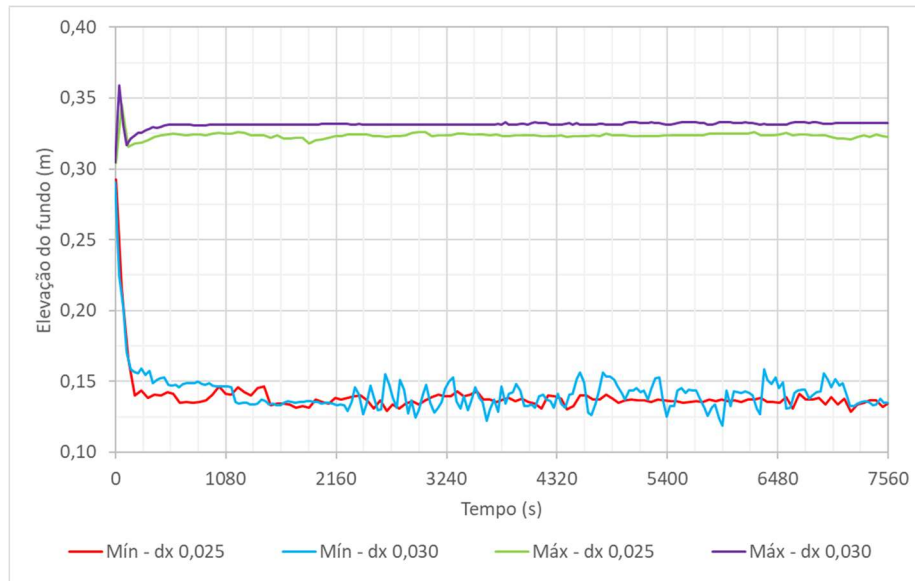


Figura 23: Variação da topografia de fundo em termos de mínimo e de máximo.

#### 4.3 EROSIÃO À JUSANTE DE VERTEDOR DE SOLEIRA LIVRE COM EMBOQUE

O caso apresentado a seguir refere-se a um cenário com uma estrutura comum em estruturas hidráulicas, um vertedor de soleira retangular. O cenário não conta com estudo de laboratório para validar os resultados, mas em um caso fictício com o objetivo de avaliar o funcionamento do *software*.

O cenário numérico é um canal retangular com 5,25 m de comprimento, 2,5 m de largura e 1,25 m de altura. Adota-se uma camada de fundo de sedimentos com 0,25 m de espessura, com grão médio ( $D_{50}$ ) de 0,0001 m, equivalente a areia fina. Com 1,25 m a partir do começo do canal, tem-se um obstáculo com um vertedor de soleira retangular em seu meio. O vertedor possui 1,25 m de altura nas paredes laterais e de 0,60 m no centro, a seção central é ligeiramente mais curta que as seções laterais, com respectivamente 0,60 m e 0,10 m. Apresenta-se na Figura 24 um esquema com as principais dimensões da simulação.

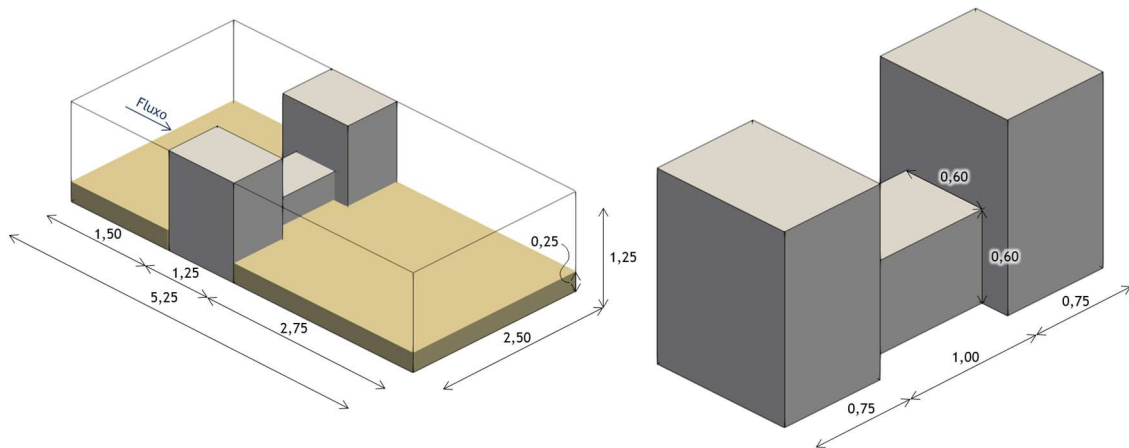


Figura 24: Esquema do cenário simulado para o estudo de erosão jusante de vertedor retangular.

O caso simulado possui uma vazão constante de  $0,40 \text{ m}^3/\text{s}$  em regime uniforme durante o período de simulação de 200 segundos.

Todos os parâmetros adotados no estudo se encontram consolidados na Tabela 5. Ressalta-se que consta no anexo do presente documento os scripts configurados para as simulações apresentadas.

Tabela 5: Parâmetros adotados na simulação numérica da Vertedor de Soleira Livre.

<b>Parâmetros Geométricos</b>		
Tipo de seção	-	Retangular
Comprimento	m	5,25
Largura	m	2,50
Altura	m	1,25
<b>Condições de Contorno</b>		
Nível d'água de entrada	m	Variável
Nível d'água de saída	m	0,60
Vazão de entrada	$\text{m}^3/\text{s}$	0,40
Vazão de saída	$\text{m}^3/\text{s}$	Variável
<b>Parâmetros Sedimentos</b>		
Diâmetro médio	m	0,0001
Densidade do sedimento	$\text{kg}/\text{m}^3$	2,650
Velocidade de queda	m/s	0,00789
Porosidade	-	0,50
Parâmetro de Shields	-	0,047
Espessura da camada de sedimentos	m	0,25
Ângulo de repouso	grau	$30,0^\circ$

Foram realizadas simulações considerando três níveis de discretização espacial, de 0,040 m, de 0,035 m e 0,030 m. Sob o aspecto dos modelos numéricos adotados, ressalta-se que a solução do termo advectivo é resolvido pelo método WENO, a solução do termo temporal pelo

TVD Runge-Kutta de 3ª ordem, o termo de pressão é resolvido pelo método das Projeções com o algoritmo BiCGStab, e o modelo de turbulência de duas equações  $k-\omega$  para ter o fechamento das equações RANS. A equação de transporte de fundo adotada foi a de Van Rijn (1984a), o fator de redução de arrasto de fundo adotado foi o de Dey (2001) em sua forma empírica.

Apresenta-se na Figura 25 e na Figura 26 cenas em perspectiva isométrica da velocidade do fluido, respectivamente, em termos de magnitude de velocidade e de velocidade na direção vertical.

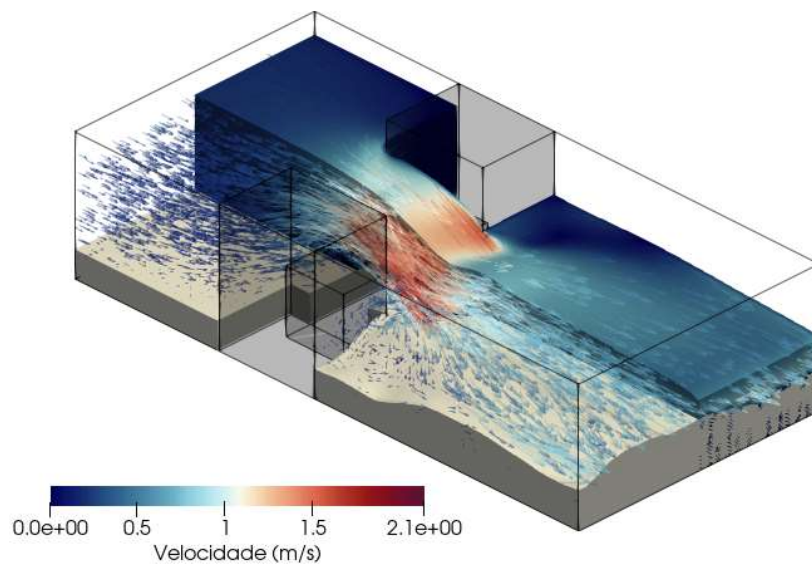


Figura 25: Magnitude de velocidades encontradas no fluido no último passo de tempo.

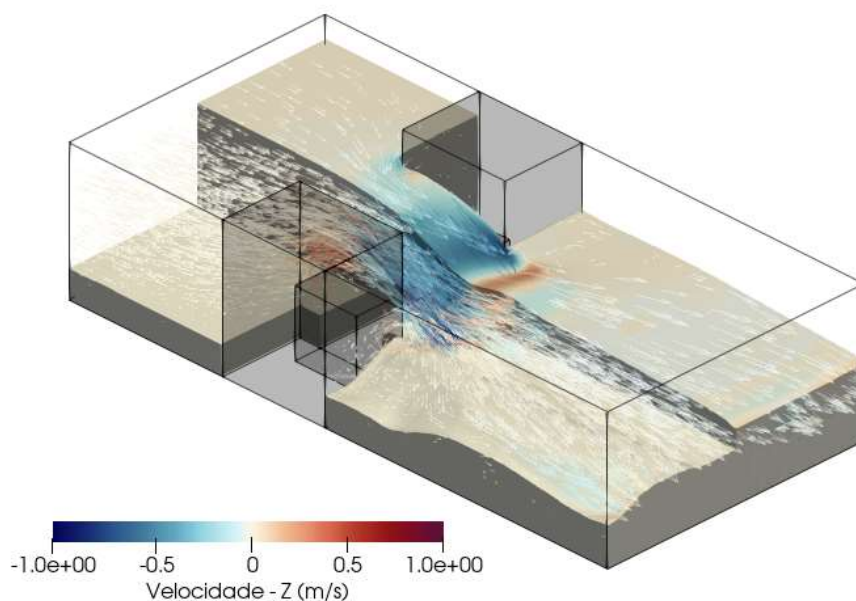


Figura 26: Velocidades em direção vertical encontradas no fluido no último passo de tempo

A cena também se encontra apresentada em sua vista superior e lateral na Figura 27 e na Figura 28 respectivamente para magnitude de velocidade e velocidade vertical.

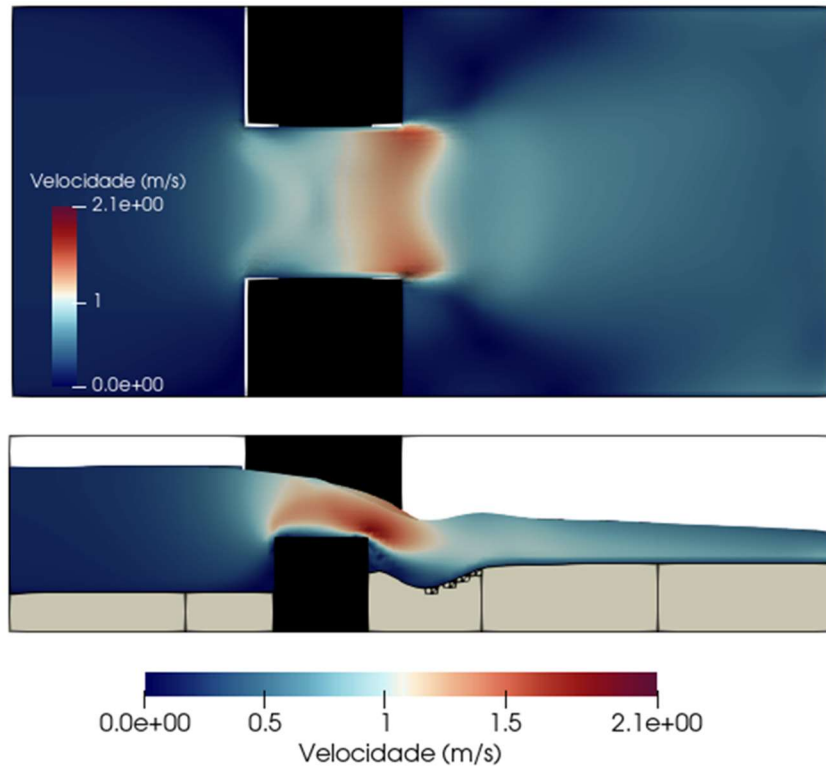


Figura 27: Distribuição da magnitude das velocidades encontradas no último instante simulado.

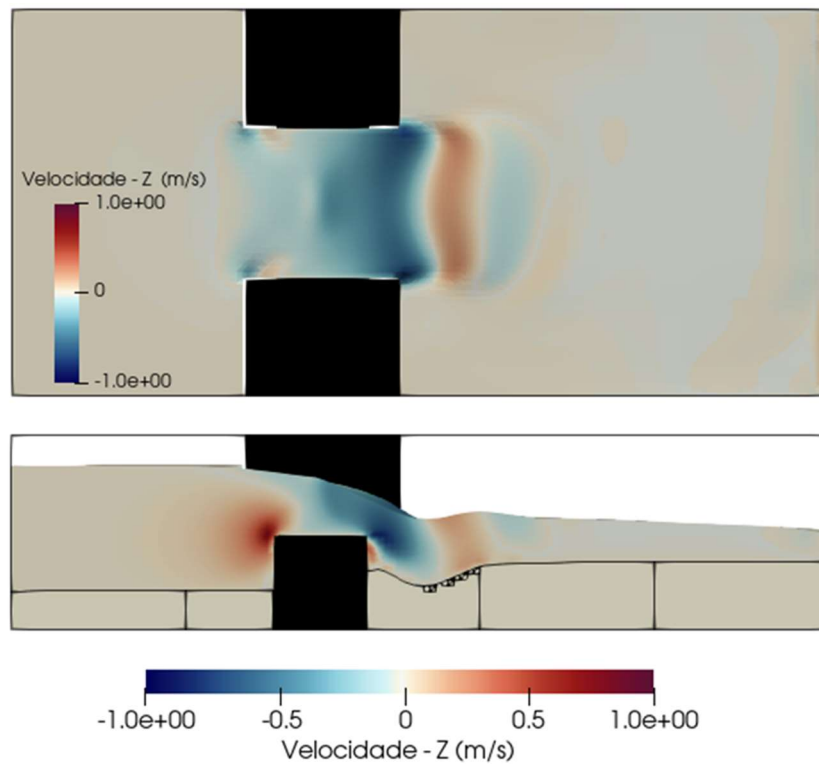
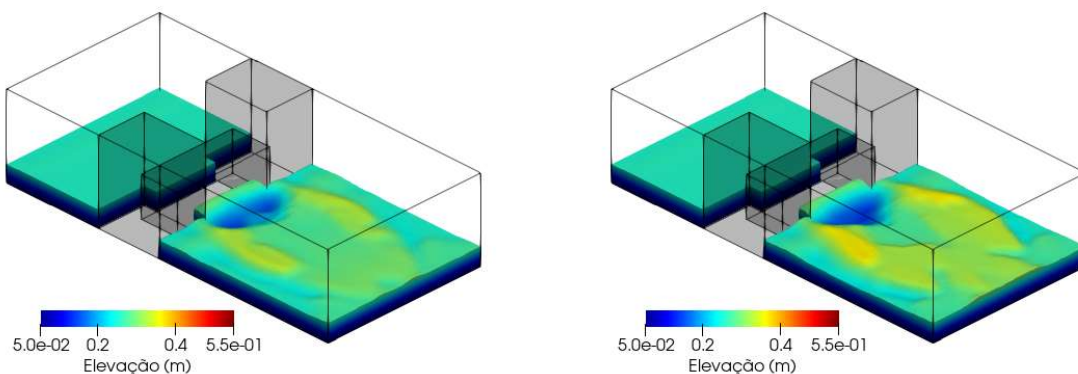


Figura 28: Distribuição das velocidades em direção vertical encontradas no último instante simulado.

Prescreveu-se uma condição de vazão constante com nível de água variável, porém, ressalta-se que logo após alguns instantes o modelo alcançou uma condição de estabilidade com a velocidade de entrada próxima de 0,30 m/s. Em termos espaciais, conforme esperado devido à montagem do experimento, as maiores velocidades foram encontradas no centro, logo após o vertedor. Os valores máximos de velocidade encontrados na superfície estão situados na faixa de 1,00 a 1,50 m/s, e ao analisar em termos da coluna d'água, observa-se que o pico de velocidade ocorreu nas proximidades da parte jusante do vertedor. Logo após o vertedor e da erosão do pé da estrutura, observa-se uma dissipação do campo de velocidades, desenvolvendo uma predominância de fluxo unidirecional da esquerda para a direita com velocidade em torno de 1,00 m/s. Nesse trecho após o vertedor, observa-se uma uniformidade com velocidades próximas a 1,00 m/s em toda a coluna d'água.

Para os resultados de velocidade vertical, cabe ressaltar a variação de  $-1,00$  m/s (para baixo) logo após o vertedor e para velocidades com direção para cima menos intensas, na faixa de menores que 0,5 m/s.

Conforme observou-se no comportamento da parcela fluida, é esperado que ocorra erosão logo no pé do vertedor, conforme observou-se nos primeiros instantes da simulação (Figura 29), porém identificou-se que a partir de um dado instante, tem-se uma predominância da deposição de sedimentos, que vieram a se depositar após a estrutura formando dois platôs, sendo o da lateral direita do experimento mais predominante.



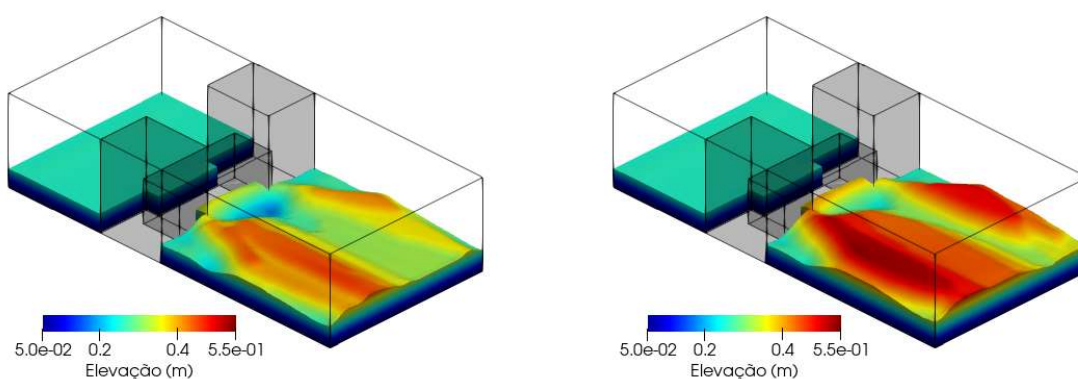


Figura 29: Evolução da topografia de fundo nos passos de tempo, da esquerda para direita e de cima para baixo, 50 s, 100 s, 150 s e 200 s.

Foram gerados gráficos para todo o período simulado das elevações mínimas e máximas do fundo de sedimentos encontradas em todo o domínio simulado, como observa-se respectivamente, nos gráficos da esquerda e da direita, na Figura 30.

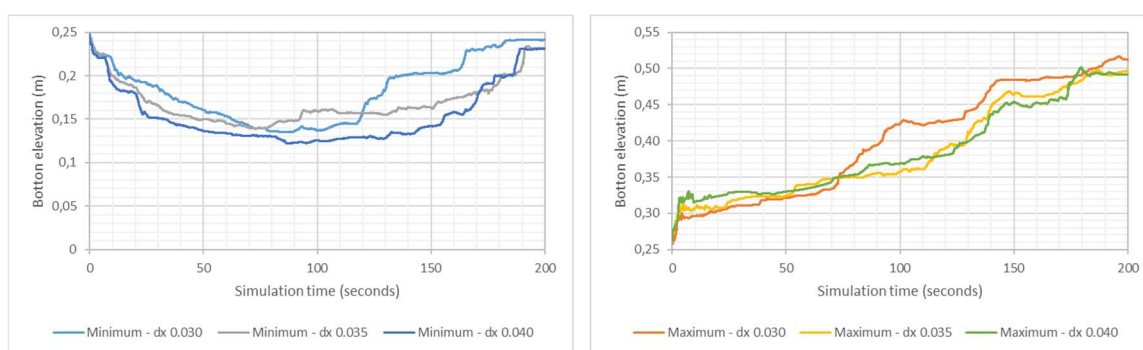


Figura 30: Variação da topografia de fundo em termos de mínimo e de máximo.

Como observa-se no gráfico esquerdo da Figura 30, nos primeiros momentos da simulação (até aproximadamente 100 s) tem-se a erosão da área jusante da estrutura, porém isso se inverte, até no último instante simulados ter-se profundidades mínimas semelhantes às encontradas no início da simulação. E por outro lado, observa-se que em termos de deposição tem-se uma intensificação do fenômeno a partir dos 100 s.

## 5 CONCLUSÕES

A presente dissertação se propôs apresentar o transporte de sedimentos utilizando modelagem numérica computacional. Os estudos foram conduzidos com o software de modelagem hidrodinâmica REEF3D, amplamente utilizado em pesquisas sobre transporte de sedimentos.

No que tange os resultados encontrados, ressalta-se que os estudos de caso do pilar cilíndrico e do obstáculo se apresentaram concordantes com os dados de validação, principalmente no que tange a localização das regiões de ocorrência de erosão e a ordem de grandeza registrados, porém cabe ressaltar que não foram exatamente os mesmos resultados encontrados em Afzal (2013). Entende-se que a modelos desse tipo dependem de uma quantidade considerável de parâmetros que não foram claramente descritos nas suas respectivas publicações, dificultando a repetitividade dos experimentos. Tendo isso em vista, todos os *scripts* utilizados no presente estudo estão disponíveis no apêndice.

O terceiro estudo de caso é particular no sentido de não possuir um experimento em modelo físico para verificá-lo, dessa forma a aplicação representa somente um caso fictício, porém bastante típico de aplicação na engenharia hidráulica. O caso foi importante para avaliar a capacidade de erosão de fundo na saída de dispositivos hidráulicos, diferentemente dos demais casos que representaram normalmente um obstáculo isolado no meio fluido.

Em todos os cenários simulados observou-se que o processo de refino das malhas implicou em resultados mais estáveis. Foi um alvo do estudo tentar exaurir a representação hidrodinâmica dos casos simulados, buscando dessa forma tirar conclusões sobre as particularidades dos resultados, avaliando principalmente os deslocamentos de água na direção vertical.

Entende-se que os resultados encontrados foram capazes de representar o transporte de sedimentos em condições hidráulicas, porém ressalta-se que as limitações encontradas no estudo, principalmente que os resultados não apresentaram valores exatamente semelhantes aos dos cenários de base. A principal limitação encontrada no estudo refere-se ao alto custo computacional para as simulações, o que dificultou a realização de mais cenários em diferentes configurações, como outras equações de transporte e de turbulência.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de mais estudos de *benchmark* para avaliar a capacidade do REEF3D em representar outros tipos de experimentos com diferentes tipos de sedimentos no fundo. Os casos analisados consideraram fundos compostos por areias finas. Avaliar cenários com velocidades mais altas e fundos compostos por matações ou britas,

materiais mais grosseiros e, conseqüentemente, mais resistentes ao escoamento são benéficos pois tais situações são encontradas em saídas de vertedores ou dissipadores de energia.

Por fim, entende-se que a ferramenta foi capaz de ser aplicada para se estudar o fenômeno de transporte de sedimentos. O método RANS, para tratamento da turbulência, é menos custoso computacionalmente que abordagens como a de LES, o que possibilita que sejam realizados estudos em máquinas menos potentes. A perspectiva que ferramentas baseadas nesses métodos se tornem ainda mais adotadas em estudos desse tipo devido à avanços na capacidade dos computadores, certamente tornará tais simulações mais viáveis. Um diferencial significativo explorado na presente dissertação refere-se à larga gama de possibilidades de se avaliar os resultados em termos tridimensionais, algo que não se encontra consolidado em aplicações de engenharia hidráulica.

## 6 BIBLIOGRAFIA

AFZAL, M. S.; BIHS, H.; KAMATH, A.; & ARNTSEN, Ø. A. **Three-dimensional numerical modeling of pier scour under current and waves using level-set method**. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 137 (3), pp. 1-7, (2014).

AFZAL, M. S.; BIHS, H., KUMAR, L. **Computational fluid dynamics modeling of abutment scour under steady current using the level set method**. International Journal of Sediment Research 35, pp. 355-364, (2020).

AHMAD, N.; BIHS, H.; KAMATH, A.; ARNSTEN, Ø. A. (2015a). **Three-dimensional CFD modeling of wave scour around side-by-side and triangular arrangement of piles with REEF3D**. Procedia Engineering, 116:683–690.

AHMAD, N.; BIHS, H., MYRHAUG, D., KAMATH, A., & ARNTSEN, Ø. A. **Three-dimensional CFD modeling of wave scour around side-by-side and triangular arrangement of piles with REEF3D**. 8th International Conference AOAC. Procedia Engineering, 116, pp. 683-690, (2015b).

AHMAD, N., BIHS, H., MYRHAUG, D., KAMATH, A., & ARNTSEN, Ø. A. **Numerical modelling of pipeline scour under the combined action of waves and current with free-surface capturing**. Coastal Engineering, 148, pp. 19-35, (2018).

BIHS, H. **Three-Dimensional Numerical Modeling of Local Scouring in Open Channel Flow**. Doctoral Theses at NTNU Trondheim, No. 127. (2011)

BURKOW, M. **Numerische simulation stromungsbedingten sedimenttransports und der entstehenden gerinnebettformen**. Master's thesis, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2010.

ELIAS, R. N. **Estruturas de dados por arestas para a simulação paralela de escoamentos incompressíveis pelo método estabilizado de elementos finitos**. Rio de Janeiro - Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2007.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M.; STREET, R. L. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. Fourth Edition. ed. [S.l.]: [s.n.], 2020.

GARCÍA, M. H. **Sedimentation Engineering - Processes, Measurements, Modeling, and Practice**. Reston: American Society of Civil Engineers, 2008.

HESTENES, M.; STIEFEL, E. **Methods of conjugate gradients for solving linear systems**. The Journal of Research of the National Institute of Standards, v. 49, n. 6, p. 409-436, 1952.

HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow**. MacMillan Company, New York. 1966

LINK, O. **Untersuchung der Kolkung an einem schlanken zylindrischen Pfeiler in sandigem Boden**. Wasser Abwasser GWF, 147(6):421–422, 2006.

MALAVASI, S; RADICE, A.; BALLIO, F. **Study of sediment motion in a local scour hole through an image processing technique**. In River Flow 2004, II International Conference on Fluvial Hydraulics, 2004.

- OSHER, S.; SETHIAN, J. A. **Fronts propagation with curvature-dependent speed: Algorithms based on hamilton-jacobi formulation.** Journal of Computational Physics, 79:12-49, 1988.
- PENG, D.; MERRIMAN, B.; OSHER, S.; ZHAU, H.; KANG, M. **A PDE-based fast local level set method.** Journal of Computational Physics, 155(2):410 – 438, 1999.
- POPE, S. B. **Turbulent Flows.** Cambridge: Cambridge University Press. (2000)
- REYNOLDS, O. **An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels.** Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 174, 935-982, 1883.
- RODI, W.; CONSTANTINESCU, G.; STOESSER, T. **Large-Eddy Simulation in Hydraulics.** [S.l.]: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, 2013.
- SEEDHARA, B., M.; SANOOJ, A.; MANU; MANDAL, S. **Simulation of Local Scour around Circular and Round Nosed Bridge Pier using REEF3D.** International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. V. 5, Spetial Issue 9, 2016.
- SHIELDS, A. **Application of similarity mechanics and turbulence research on shear flow.** Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau, 1936.
- STEIN, E.; BORST, R.; HUGHES, T. J. R. **Encyclopedia of Computational Mechanics.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- SUSSMAN, M.; SMEREKA, P.; AND OSHER, S. **A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow.** Journal of Computational Physics, 114:146–159, 1994.
- VAN DER VORST, H. **Bi-CGStab: A fast and smoothly converging variant of Bi-CG for the Solution of Nonsymmetric Linear Systems.** Journal on Scientific and Statistical Computing, v. 13, n. 2, 1992.
- WIDERA, P. **Study of sediment transport processes using Reynolds Averaged Navier-Stokes and Large Eddy Simulation.** Brussel: Vrije Universiteit Brussel, 2011.
- YE, Y et al. **Chapter 8 - Local Scour and Protection of Marine Structures.** Marine Geo-Hazards in China, Elsevier, Pages 297-366, 2017.
- ZENG, J.; CONSTANTINESCU, G.; AND WEBER, L. **A fully 3D Non-Hydrostatic Model for Prediction of Flow, Sediment Transport and Bed Morphology in Open Channels.** In In Proceedings of the 31st IAHR Congress, pages 1327–1338, Thessa-Ioniki, Greece, 2005.

## 7 APÊNDICE

As simulações do REEF3D têm de *input* dois arquivos em formato txt. São os arquivos *control* e *ctrl*, que se referem respectivamente a construção da malha e da simulação. Serão apresentados os dois *scripts* para cada uma das simulações.

### 7.1 EROSÃO EM PILAR CILÍNDRICO

Arquivo de controle (*control*)

C 11 1  
C 12 21  
C 13 21  
C 14 2  
C 15 21  
C 16 3  
B 1 0.025  
B 10 0.0 4.0 0.0 2.0 0.0 0.8  
O 33 2.0 1.0 0.2  
M 10 6  
M 20 2

Arquivo de controle (*ctrl*)

B 10 1  
B 11 1  
B 50 0.0001  
B 60 1  
D 10 4  
D 30 1  
F 30 3  
F 40 3  
F 50 2  
F 60 0.6  
I 10 1  
I 20 1500  
N 10 14  
N 11 11  
N 40 6  
N 41 7560

N 45 1000000  
N 47 0.3  
M 10 6  
P 10 1  
P 30 250  
P 26 1  
P 27 1  
P 79 1  
P 126 1  
T 10 2  
W 10 0.18  
W 22 -9.81  
S 10 1  
S 11 1  
S 12 1  
S 41 2  
S 45 5  
S 20 0.00097  
S 23 0.155  
S 24 0.75  
S 30 0.0125  
S 50 1  
S 57 0.3  
S 71 0.5  
S 80 3  
S 81 29  
S 82 2  
S 90 1  
S 91 1000

## 7.2 EROSIÃO EM CANAL COM OBSTÁCULO

Arquivo de controle (*control*)

C 11 1  
C 12 21  
C 13 21  
C 14 2  
C 15 21  
C 16 3  
B 1 0.025

B 10 0.0 4.0 0.0 0.6 0.0 0.6

O 10 2.2 2.3 0.4 0.6 0.0 0.6

M 10 6

M 20 2

### Arquivo de controle (*ctrl*)

B 10 1

B 11 1

B 50 0.0001

B 60 1

D 10 4

D 20 2

D 30 1

F 30 3

F 40 3

F 42 1

F 50 3

F 60 0.395

F 61 0.395

F 62 0.395

I 10 1

I 12 1

N 10 14

N 11 11

N 40 3

N 41 7560

N 45 10000000

N 47 0.3

M 10 6

P 10 1

P 25 1

P 26 1

P 27 1

P 30 360

P 79 1

P 122 1

P 126 1

T 10 2

T 11 12

T 41 1  
W 1 1000  
W 10 0.027  
W 22 -9.81  
S 10 1  
S 11 1  
S 12 1  
S 20 0.0019  
S 21 3.5  
S 23 0.1742  
S 24 0.75  
S 30 0.03  
S 41 2  
S 45 1  
S 50 4  
S 57 0.3  
S 60 3  
S 71 0.75  
S 80 1  
S 81 50  
S 82 10  
S 84 2  
S 90 3  
S 91 1000  
S 93 0

### 7.3 EROSIÃO À JUSANTE DE VERTEDOR DE SOLEIRA ESPESSA

Arquivo de controle (*control*)

C 11 1  
C 12 21  
C 13 21  
C 14 2  
C 15 21  
C 16 3  
B 1 0.030  
B 10 0.0 5.25 0.0 2.5 0.0 1.25  
O 10 1.5 2.5 0.0 0.75 0.0 1.25  
O 10 1.7 2.3 0.5 2.0 0.0 0.60  
O 10 1.5 2.5 1.75 2.5 0.0 1.25

G 10 0  
G 15 2  
G 31 10  
M 10 6  
M 20 2

Arquivo controle (*ctrl*)

B 10 1  
B 50 0.0001  
B 60 1  
B 75 2  
B 77 2  
D 10 4  
D 20 2  
D 30 1  
F 30 3  
F 40 3  
F 42 1.0  
F 50 2  
F 60 0.62  
F 62 0.6  
G 50 0  
G 52 2  
I 10 1  
I 11 1  
I 12 1  
N 10 14  
N 11 11  
N 40 3  
N 41 210  
N 45 1000000  
N 47 0.1  
M 10 6  
P 10 1  
P 15 2  
P 26 1  
P 27 1  
P 28 1  
P 30 25  
P 76 1

P 77 1  
P 78 1  
P 79 1  
P 122 1  
P 126 1  
T 10 2  
W 10 0.4  
W 22 -9.80655  
S 10 1  
S 11 1  
S 12 1  
S 16 3  
S 17 1  
S 20 0.0001  
S 23 0.00789  
S 25 30.0  
S 30 0.047  
S 43 1000  
S 50 1  
S 57 0.25  
S 60 3  
S 80 1  
S 90 1  
S 91 1000  
S 100 1  
S 101 2