U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

ESCOAMENTO EM TORNO DE PILARES: ESTUDO AVANÇADO COM RECURSO A CFD

GONÇALO DE SOUSA POLÓNIA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE

Orientador: Professora Doutora Elsa Maria da Silva Carvalho

Coorientador: Doutor Lourenço Sassetti Mendes

JULHO 2026

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2025/2026

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais

He who has a why to live can bear almost any how

Friedrich Nietzsche

AGRADECIMENTOS

A concretização desta dissertação não teria sido possível sem o apoio, a orientação e a dedicação de várias pessoas, às quais expresso o meu mais sincero agradecimento.

À Professora Doutora Elsa, orientadora desta dissertação, manifesto o meu profundo agradecimento por toda a disponibilidade, dedicação e constante vontade de ajudar ao longo deste percurso. Agradeço a confiança depositada, a predisposição para esclarecer todas as dúvidas, o rigor científico e académico que sempre imprimiu ao desenvolvimento deste trabalho e o incentivo permanente para realizar um ótimo trabalho.

Ao Doutor Lourenço, meu coorientador, deixo um agradecimento muito especial por todo o tempo que generosamente dedicou a este trabalho. As inúmeras reuniões, a disponibilidade constante para discutir ideias e esclarecer questões, bem como o esforço incansável que colocou na melhoria desta dissertação, foram fundamentais para o resultado final.

Aos meus pais, obrigado por todo o apoio incondicional, por nunca deixarem de acreditar em mim e por todas as palavras de incentivo e constante motivação que me deram nos momentos mais exigentes. Agradeço também pela educação que me deram e proporcionaram, pelos valores que me transmitiram e pela confiança que sempre depositaram em mim. Sem vocês, esta etapa não teria sido possível.

Aos meus amigos Miguel, Chaves e Brandão, agradeço por todos os momentos que passámos juntos e acima de tudo pela amizade que marcou certamente este percurso. A vossa presença tornou esta etapa mais leve, mais feliz e mais fácil de ultrapassar, conferindo-lhe um significado que dificilmente teria sem vocês.

Ao Jacinto e à Margarida, que partilharam comigo estes cinco meses durante a tese, agradeço toda a entreajuda, o apoio constante e a companhia ao longo deste percurso.

Ao Pestana, Alex, Mike e André, que realizaram comigo o mestrado, agradeço a companhia diária, o apoio e todos os momentos partilhados ao longo destes dois anos.

A todos os restantes amigos que, de diferentes formas, contribuíram para tornar esta fase mais bonita, agradeço sinceramente todo o apoio, a companhia e a presença ao longo deste percurso.

RESUMO

A erosão localizada em torno de fundações de pontes constitui um dos principais mecanismos de instabilidade estrutural em obras hidráulicas, reduzindo progressivamente o comprimento de encastramento da fundação, podendo, em casos extremos, precipitar o colapso da estrutura. A correta caracterização do escoamento na região circundante do pilar, nomeadamente das estruturas hidrodinâmicas que promovem este processo, é por isso essencial para o dimensionamento e avaliação da segurança de pilares de pontes.

Com isto em mente, a presente dissertação propõe-se a estudar, com recurso a modelação numérica através do software *OpenFOAM*, o escoamento em torno de um pilar circular abordando três configurações distintas do leito com fundo fixo: sem erosão, com erosão numa camada de areia fina e com erosão em duas camadas de areia fina e grossa, caracterizando as estruturas do escoamento associadas a cada configuração e o seu efeito sobre o pilar.

A metodologia foi dividida em duas fases. Na primeira, realizaram-se simulações bidimensionais, cujo foco incidiu em estabelecer um primeiro contacto com o software de simulação (*OpenFOAM*), bem como com os softwares de pré e pós-processamento, como é o caso do *ParaView*. Numa segunda fase, procedeu-se à modelação tridimensional do escoamento, através do solver *interFoam*, para três configurações de fundo fixo: um leito plano, adotado como caso de referência, e duas cavidades de erosão obtidas a partir de nuvens de pontos levantadas nos ensaios experimentais de referência. O trabalho desenvolvido nesta dissertação é exclusivamente numérico, tendo a campanha experimental servido como fonte das geometrias do leito e das condições de escoamento impostas ao modelo.

Os resultados evidenciaram que a presença da cavidade de erosão altera de forma significativa o desenvolvimento do vórtice de ferradura, do escoamento descendente e dos vórtices de esteira, intensificando as duas primeiras estruturas junto à base do pilar, em detrimento de uma esteira a jusante com estruturas turbulentas menos coerentes e com um desprendimento mais irregular. As diferenças entre as duas configurações com cavidade de erosão localizada revelaram-se mais moderadas, evidenciando a existência de uma relação bidirecional entre o escoamento e a geometria da cavidade: o escoamento promove a formação da erosão localizada e a geometria resultante influencia, por sua vez, os campos de velocidade e as estruturas vorticosas desenvolvidas em torno do pilar.

Deste modo, constata-se que a metodologia adotada permitiu identificar corretamente os diferentes fenómenos hidrodinâmicos presentes em torno do pilar, mesmo nas configurações com erosão. Os resultados obtidos contribuem assim para um melhor entendimento do comportamento hidrodinâmico em condições próximas das que ocorrem em situações reais, constituindo um bom ponto de partida para a avaliação da segurança de fundações de pontes em leitos com estratificação sedimentar, identificando-se ainda um conjunto de limitações e propostas de desenvolvimentos futuros, nomeadamente a modelação do processo de transporte de sedimentos bem como a evolução temporal das cavidades de erosão.

PALAVRAS-CHAVE: escoamento em torno de pilar, erosão, vórtices, Dinâmica de Fluídos Computacional, OpenFOAM.

ABSTRACT

Local scour around bridge foundations is one of the main mechanisms of structural instability in hydraulic structures, progressively reducing the embedment length of the foundation and, in extreme cases, leading to structural collapse. Therefore, the accurate characterization of the flow surrounding bridge piers, particularly the hydrodynamic structures responsible for this process, is essential for the design and safety assessment of bridge foundations.

With this motivation, the present dissertation investigates the flow around a circular bridge pier using *Computational Fluid Dynamics* (CFD) simulations performed with the open-source software *OpenFOAM*. Three fixed-bed configurations were considered: a flat bed without scour, a scour cavity developed in a single layer of fine sand, and a scour cavity developed in a two-layer sediment bed composed of fine and coarse sand. The study aims to characterize the flow structures associated with each configuration and evaluate their influence on the hydrodynamic behaviour around the pier.

The methodology was divided into two stages. The first consisted of two-dimensional simulations, primarily intended to establish familiarity with the *OpenFOAM* environment, as well as the pre- and post-processing tools, namely *ParaView*. In the second stage, three-dimensional simulations were carried out using the *interFoam* solver for the three bed configurations investigated in the experimental facility. The scour cavity geometries were reconstructed from point clouds obtained during the reference experimental campaign adopted as the case study.

The results showed that the presence of a scour cavity significantly modifies the development of the horseshoe vortex, the downflow, and the wake vortices, intensifying the first two structures near the base of the pier while leading to a less stable wake downstream. The differences between the two scour configurations were more moderate, highlighting the bidirectional relationship between the flow and the scour cavity geometry: the flow drives the formation of local scour, while the resulting cavity geometry, in turn, influences the velocity field and the vortical structures developing around the pier.

Overall, the adopted methodology proved capable of accurately identifying the main hydrodynamic phenomena occurring around the pier, including the configurations with scour. The findings contribute to a better understanding of flow behaviour under conditions representative of real bridge foundations and provide a useful basis for the assessment of bridge foundation safety in stratified sediment beds. The study also identifies several limitations and proposes future developments, particularly regarding the numerical modelling of sediment transport and the temporal evolution of scour cavities.

KEYWORDS: flow around a pier, erosion, vortex, Computational Fluid Dynamics, *OpenFOAM*,

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS I
RESUMO III
ABSTRACT V

ÍNDICE GERAL VII
1 INTRODUÇÃO 1
1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS 1
1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO 3
2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO 5
2.1 ESCOAMENTO EM TORNO DE UM PILAR SIMPLES 6
2.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS 12
2.3 MODELAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO EM TORNO DE PILARES 17
3 MODELAÇÃO NUMÉRICA DE FLUÍDOS 23
3.1 INTRODUÇÃO À DINÂMICA DE FLUÍDOS COMPUTACIONAL 23
3.2 EQUAÇÕES GOVERNATIVAS 24
3.3 MODELOS DE TURBULÊNCIA 27
3.3.1 Modelos Baseados nas Equações RANS 28
3.3.1.1 Modelo Standard $k-\varepsilon$ 29
3.3.1.2 Modelo $k-\omega$ 30
3.3.1.3 Modelo Shear-Stress Transport $k-\omega$ 31
3.3.2 LES - Large Eddy Simulation 31
3.3.3 DNS – Direct Numeric Simulation 32
3.4 MÉTODOS PARA DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL 33
3.5 MALHAS COMPUTACIONAIS 34

4 CASO DE ESTUDO 37

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL 38

4.2 CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO 41

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO LEITO 43

4.3.1 Caracterização dos Sedimentos 44

4.3.2 Caracterização das Camadas dos *Ensaios* 48

4.4 PROFUNDIDADE E EXTENSÃO DA CAVIDADE DE EROSÃO 49

5 METODOLOGIA 53

5.1 CONFIGURAÇÃO DE UM CASO OPENFOAM 55

5.2 SIMULAÇÕES 2D 57

5.3 SIMULAÇÕES 3D 60

5.3.1 Preparação da Geometria 61

5.3.2 Malhas 64

5.3.3 Condições de Fronteira 66

5.3.4 Definições Numéricas 67

6 ANÁLISE DE RESULTADOS 69

6.1 SIMULAÇÕES 2D 69

6.1.1 Estudo da Influência da Resolução da Malha 69

6.1.2 Análise do Campo de Velocidades 73

6.2 SIMULAÇÕES 3D 76

6.2.1 Configuração C0 - sem Cavidade de Erosão 76

6.2.2 Configuração C1 - com Uma Camada de Areia Fina 79

6.2.3 Configuração C2 - com Duas Camadas de Areia 83

6.2.4 Identificação das Principais Estruturas do Escoamento 86

6.2.5 Análise Comparativa 91

6.2.5.1 Comparação das Configurações C0 e C1 91

6.2.5.2 Comparação das Configurações C1 e C2 95

6.2.5.3 Análise e Comparação dos Parâmetros do Escoamento 98

7 CONCLUSÕES 101

7.1 CONCLUSÕES.....101

7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da cavidade de erosão (Whitehouse, 1998) 5

Figura 2 - Alteração do campo de pressões e escoamento a montante do pilar (Fael, 2007) 6

Figura 3 - Estruturas do Escoamento em Pilares Cilíndricos (Castiblanco, 2016) 7

Figura 4 - Identificação da superfície de enrolamento e do escoamento descendente através das linhas de corrente (Unger & Hager, 2007) 8

Figura 5 - Visualização do Vórtice de Ferradura (Ramos, 2012; Ettema et al., 2017) 8

Figura 6 - Vórtice Secundário (Ramos, 2012) 8

Figura 7 - Visualização dos Vórtices de Esteira (adaptado de Castiblanco, 2016) 9

Figura 8 - Variação do desprendimento dos vórtices em função do número de Reynolds (Pinto, 2008) 10

Figura 9 - Variação do desprendimento dos vórtices em função do número de *Reynolds* (Sumer & Fredsøe, 1997) 11

Figura 10 - Forças Atuantes num Grão de Sedimento (*DeVos, 2008*) 13

Figura 11 - Diagrama de Shields (Shields, 1936) 14

Figura 12 - Diagrama de Shields adaptado por Soulsby (Soulsby, 1997) 15

Figura 13 - Evolução da profundidade da cavidade de erosão em condições *clear-water* e *live-bed (Hoffmans & Verheij, 2021)* 16

Figura 14 – Cavidade de erosão junto a pilares simples: a) esquema (Wikipédia); b) ensaio experimental (Pinheiro, 2010). 17

Figura 15 - Tipos de Malhas (adaptado de Anderson, 1995) 34

Figura 16 - Exemplo de Malha Ortogonal (Gonçalves, 2007) 35

Figura 17 - Exemplo de Malha Não Ortogonal (Gonçalves, 2007) 35

Figura 18 - Exemplo de Malha Não Estruturada (Gonçalves, 2007) 36

Figura 19 - Vistas Gerais do Canal (Chaves, 2024) 38

Figura 20 - Caixa de Sedimentos (Chaves, 2024) 39

Figura 21 - Rampa de transição (Chaves, 2024) 39

Figura 22 - Esquema do Canal de Laboratório (em metros) 40

Figura 23 - Peças do Pilar (Ana Chaves, 2024) 40

Figura 24 - Perfil de Velocidades (Ana Chaves, 2024) 41

Figura 25 - Perfil de Velocidades Reconstruído 42

Figura 26 - Areias Utilizadas para os Ensaios de Referência 45

Figura 27 - Curvas Granulométricas das Areias de Referência 48

Figura 28 - Nuvem de Pontos da Configuração C1 51

Figura 29 - Nuvem de Pontos da Configuração C2 51

Figura 30 - Vista Geral da Malha *MeshRes1* 60

Figura 31 - Vista Geral da Malha *MeshRes5* 60

Figura 32 – Configurações C1 e C2 em formato *STL* obtidas através dos Dados Experimentais 61

Figura 33 - Área da Caixa de Sedimentos Digitalizada nas Configurações C1 e C2. 62

Figura 34 - Geometrias Finais Consideradas para as Configurações C1 e C2 64

Figura 35 - Corte Longitudinal das Configurações C0, C1 e C2 (MeshRes5) 65

Figura 36 - Malhas Utilizadas nas Simulações 2D 70

Figura 37 - Evolução do C_D médio em Função do Número de Células 72

Figura 38 - Evolução do C_L máximo em Função do Número de Células 73

Figura 39 – Simulação 2D - Campo de Velocidades (t=0.5s) 74

Figura 40 - Simulação 2D - Campo de Velocidades (t=15s) 75

Figura 41 - Simulação 2D - Campo de Velocidades (t=70s) 76

Figura 42 - Campo de Velocidades no Plano Horizontal (z = 0.075 m) na Configuração C0 (t = 200 s) 77

Figura 43 - Campo de Velocidades no Plano Longitudinal (y = 0 m) na Configuração C0 (t = 200 s) 77

Figura 44 - Linhas de Corrente na Proximidade do Pilar na Configuração C0 (t = 200 s) 79

Figura 45 - Campo de Velocidades no Plano Horizontal (z = 0.075 m) na Configuração C1 (t = 200 s) 80

Figura 46 - Campo de Velocidades no Plano Longitudinal (y = 0 m) na Configuração C1 (t = 200 s) 81

Figura 47 - Linhas de Corrente na Proximidade do Pilar na Configuração C1 (t = 200 s) 82

Figura 48 - Campo de Velocidades no Plano Horizontal (z = 0.075 m) na Configuração C2 (t = 200 s) 83

Figura 49 - Campo de Velocidades no Plano Longitudinal na Configuração C2 (t = 200 s) 84

Figura 50 - Linhas de Corrente na Proximidade do Pilar na Configuração C2 (t = 200 s) 85

Figura 51 - Vista Tridimensional do Vórtice em Ferradura nas 3 Configurações (t = 200 s)..... 87

Figura 52 - Vista Superior do Vórtice de Esteira nas 3 Configurações (t = 200 s) 88

Figura 53 - Vista 3D do Vórtice de Esteira nas 3 Configurações (t = 200 s) 89

Figura 54 - Visualização do Escoamento Descendente nas 3 Configurações (t = 200 s)..... 90

Figura 55 - Perfis Longitudinais da Velocidade U_x para C0 e C1 (z = 0.03 m)..... 93

Figura 56 - Perfis Longitudinais da Velocidade U_x para C0 e C1 (z = 0.075 m)..... 94

Figura 57 - Perfis Longitudinais da Velocidade U_x para C1 e C2 (z = 0.03 m)..... 96

Figura 58 - Perfis Longitudinais da Velocidade U_x para C1 e C2 (z = 0.075 m)..... 98

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Valores da fração de fase (VoF) 26

Tabela 2 - Parâmetros Hidráulicos do Escoamento 43

Tabela 3 - Análise da Granulometria da Areia Fina 46

Tabela 4 - Análise Granulométrica da Areia Grossa 47

Tabela 5 - Profundidade de Erosão das Configurações C1 e C2 (Zefzouf et al., 2025) 50

Tabela 6 - Extensão Máxima da Cavidade de Erosão das Configurações C1 e C2 (Zefzouf et al., 2025) 50

Tabela 7 - Parâmetros de Controlo Temporal da Simulação (*controlDict*) 57

Tabela 8 - Número de Células por Nível de Refinamento (Simulações 2D) 59

Tabela 9 - Número de Células por Configuração e Nível de Resolução (Simulações 3D) 66

Tabela 10 - Condições de Fronteira das Simulações 3D 67

Tabela 11 - Modelos Numéricos Utilizados nas Simulações 3D (*fvSchemes*) 68

Tabela 12 - Parâmetros avaliados nas Simulações 2D 71

Tabela 13 - Parâmetros avaliados nas Simulações 3D 99

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

$A*$	$[m^2]$	Área projetada do grão de sedimento no plano horizontal
A_h	$[m^2]$	Área de projeção horizontal do pilar
A_v	$[m^2]$	Área de projeção vertical do pilar
b	$[m]$	Largura do canal
C_D	$[-]$	Coeficiente de arrastamento
C_L	$[-]$	Coeficiente de sustentação
D	$[m]$	Diâmetro do pilar
$D*$	$[-]$	Diâmetro adimensional do grão
D50	$[mm]$	Diâmetro médio dos sedimentos
E	$[cm]$	Extensão máxima da cavidade de erosão
f	Hz	Frequência de desprendimento dos vórtices
F_D	$[N]$	Força de arrastamento
F_L	$[N]$	Força de sustentação
F_σ	$[N]$	Força de tensão superficial
g	$[\mathrm{m\,s^{-2}}]$	Aceleração da gravidade
h	$[m]$	Altura do escoamento
k	$[\mathrm{m^2\,s^{-2}}]$	Energia cinética turbulenta
$p*$	$[Pa]$	Pressão pseudo-dinâmica
Q	L/s	Caudal
Re	$[-]$	Número de *Reynolds*
$Re*$	$[-]$	Número de *Reynolds* no grão de sedimento
S/D	$[-]$	Profundidade de erosão adimensional
S_C	$[cm]$	Profundidade máxima da cavidade de erosão
St	$[-]$	Número de *Strouhal*
t	$[s]$	Tempo
t_e	$[s]$	Tempo até à profundidade de equilíbrio
U	$[m/s]$	Velocidade do escoamento

$u*$	$[m/s]$	Velocidade de atrito
V_{ic}	$[m/s]$	Velocidade de compressão da interface
$\vec{X}$	$[m]$	Vetor posição
α	$[-]$	Fração volumétrica de fase
μ	$[kg/m/s]$	Viscosidade dinâmica do fluido
γ_{cr}	$[-]$	Parâmetro de Shields
ρ	$[kg/m^3]$	Massa volúmica do fluido
ρ_s	$[kg/m^3]$	Massa volúmica do sedimento
σ	$[kg/s^2]$	Coeficiente de tensão superficial
τ_b	$[Pa]$	Tensão de corte no leito
τ_{cr}	$[Pa]$	Tensão crítica de arrastamento
ω	$[s^{-1}]$	Taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta
ε	$[s^{-1}]$	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta

ADV	Acoustic Doppler Velocimetry
CAD	Computer-Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CS1	Designação da areia grossa utilizada nos ensaios
DNS	Direct Numeric Simulation
FS1	Designação da areia fina utilizada nos ensaios
HPC	High Perfomance Computing
LES	Large Eddy Simulation
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MVF	Método dos Volumes Finitos
PIMPLE	Pressure Implicit Method for Pressure Linked Equations
PISO	Pressure Implicit with Splitting of Operators
PIV	Particle Image Velocimetry
PVC	Policloreto de Vinila

RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RNG	Modelo *k*-ε Renormalization
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
SST	Shear Stress Transport
STL	Standard Triangle Language
URANS	Unsteady RANS
VoF	Volume of Fluid

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

As pontes constituem infraestruturas de importância crítica para o funcionamento das redes de transporte e para o desenvolvimento económico e social das regiões onde se inserem. A sua integridade estrutural é, por isso, uma preocupação permanente para engenheiros, gestores de infraestruturas e entidades reguladoras. Entre os diversos fatores que podem comprometer essa integridade, a erosão localizada junto aos pilares, é reconhecida internacionalmente como uma das principais causas de colapso de pontes. Em Portugal, o trágico acidente de Entre-os-Rios, ocorrido no rio Douro, foi parcialmente atribuído à erosão local verificada na base de um dos pilares da ponte, reforçando deste modo, a urgência de aprofundar o conhecimento sobre estes fenómenos e de melhorar as ferramentas disponíveis para a sua previsão e mitigação.

O fenómeno de erosão localizada resulta da interação entre o escoamento e o leito do rio nas imediações do pilar. Quando o escoamento encontra um obstáculo, como um pilar de ponte, o campo de velocidades é perturbado e surgem estruturas de escoamento complexas, nomeadamente vórtices em ferradura, escoamento descendente e vórtices de esteira, que amplificam localmente a tensão de corte exercida sobre os sedimentos do leito. Quando esta tensão excede o limiar de mobilização dos sedimentos, inicia-se um processo de erosão que pode originar cavidades de erosão de profundidade considerável em torno da base do pilar, reduzindo progressivamente o comprimento de encastramento da fundação e, em casos extremos, precipitando o colapso da estrutura.

A complexidade deste problema aumenta consideravelmente quando se considera que os leitos naturais dos rios raramente correspondem a solos homogéneos. Na realidade, o leito de um curso de água é frequentemente composto por camadas de sedimentos com características distintas: diferentes granulometrias, densidades e graus de coesão, resultado de processos de deposição que ocorreram ao longo do tempo geológico e hidrológico. Esta estratificação sedimentar tem implicações diretas no comportamento erosivo junto aos pilares: a presença de camadas de diferente resistência à erosão pode alterar significativamente a geometria da cavidade de erosão, a velocidade a que esta se desenvolve e o estado de equilíbrio que eventualmente se atinge. Um leito com uma camada superficial mais fina sobreposta a uma camada mais grossa, ou o inverso, responde de forma muito diferente à ação hidrodinâmica dos vórtices do que um leito uniforme e essas diferenças têm consequências diretas na segurança da fundação.

Apesar da relevância prática deste tema, a literatura dedicada à modelação do escoamento em torno de pilares com leito estratificado e erodido é ainda escassa, sobretudo no que diz respeito a abordagens numéricas tridimensionais. Grande parte dos estudos existentes foca-se em leitos homogéneos e em condições idealizadas, o que limita a sua aplicabilidade a situações reais de engenharia. É precisamente neste contexto que a utilização de ferramentas de dinâmica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) se revela particularmente promissora. Estas ferramentas permitem simular em detalhe o escoamento tridimensional em torno de pilares e reproduzir as estruturas de vórtices responsáveis pela erosão, para diferentes configurações de leito. Os ensaios em modelo reduzido, dimensionados por semelhança de *Froude*, não permitem respeitar simultaneamente a semelhança de *Reynolds* nem reduzir à escala a granulometria dos sedimentos, o que origina efeitos de escala. A modelação numérica evita estes efeitos, embora introduza limitações próprias, associadas ao modelo de turbulência e à malha adotados, exigindo validação experimental.

É neste enquadramento que se insere a presente dissertação. O trabalho aqui desenvolvido propõe-se estudar, com recurso ao software OpenFOAM, o escoamento em torno de um pilar cilíndrico para três configurações distintas de leito com fundo fixo, sem erosão, com erosão e uma camada de sedimentos e com erosão e duas camadas de sedimentos, caracterizando as estruturas do escoamento associadas a cada configuração, nomeadamente as zonas de alta velocidade, de recirculação e de formação de vórtices. Os resultados obtidos contribuem para um melhor entendimento do comportamento hidrodinâmico em condições próximas das que ocor-

rem em situações reais, constituindo uma base de conhecimento útil para o dimensionamento e avaliação da segurança de fundações de pontes em leitos com estratificação sedimentar.

1.2 Estrutura do Documento

O presente documento encontra-se dividido em sete capítulos, organizados de forma a proporcionar uma leitura clara e estruturada do trabalho que foi desenvolvido.

O primeiro capítulo apresenta o enquadramento geral do tema, identifica o problema em questão e a sua relevância. São ainda definidos os objetivos da dissertação e a estrutura do documento.

O segundo capítulo reúne os principais conceitos teóricos necessários para uma melhor compreensão da abordagem realizada e para a interpretação e análise dos resultados. São também descritos os fenómenos mais relevantes que ocorrem em torno do pilar e apresentado um conjunto de estudos realizados sobre o escoamento em torno de pilares e a sua modelação com recurso a *CFD*.

O terceiro capítulo apresenta os fundamentos que servem de base à modelação numérica de fluídos. São descritas as equações governativas do escoamento, os principais modelos de turbulência e os diferentes tipos de malhas computacionais.

No quarto capítulo são apresentadas as características do caso de estudo que serve de base para a modelação numérica nomeadamente as dimensões do canal laboratorial, a granulometria dos sedimentos utilizados, as condições de escoamento e os principais parâmetros considerados e as diferentes de configuração do leito que serão alvo de análise.

O quinto capítulo aborda a metodologia utilizada nas simulações numéricas realizadas. É descrito o processo que inicia na construção geométrica do modelo até à sua implementação numérica.

No sexto capítulo apresenta-se e interpreta-se os resultados obtidos nas simulações numéricas, destacando os aspetos mais relevantes.

Por fim, o sétimo capítulo sintetiza as principais conclusões do trabalho desenvolvido, apresenta as considerações finais do estudo, menciona as principais limitações do estudo e propõe possíveis abordagens futuras a realizar.

2
ENQUADRAMENTO TEÓRICO

As pontes são estruturas fundamentais para o desenvolvimento económico da sociedade, proporcionando a conexão entre pessoas e locais. No entanto, os seus pilares, quando instalados no leito de um rio, originam alterações no escoamento que poderão levar a fenómenos de erosão localizada e, consequentemente, pôr em risco a sua estrutura. Com a presença de pilares, desenvolvem-se escoamentos turbulentos, com padrões complexos de vórtices e correntes secundárias, que aumentam as tensões de corte atuantes sobre as partículas do leito. Quando estas tensões excedem os valores críticos, inicia-se o transporte de sedimentos, desenvolvendo-se uma cavidade de erosão em torno do pilar (Figura 1), cujas características dependem de um conjunto de parâmetros, que traduz a interação entre o escoamento, o pilar e os sedimentos.

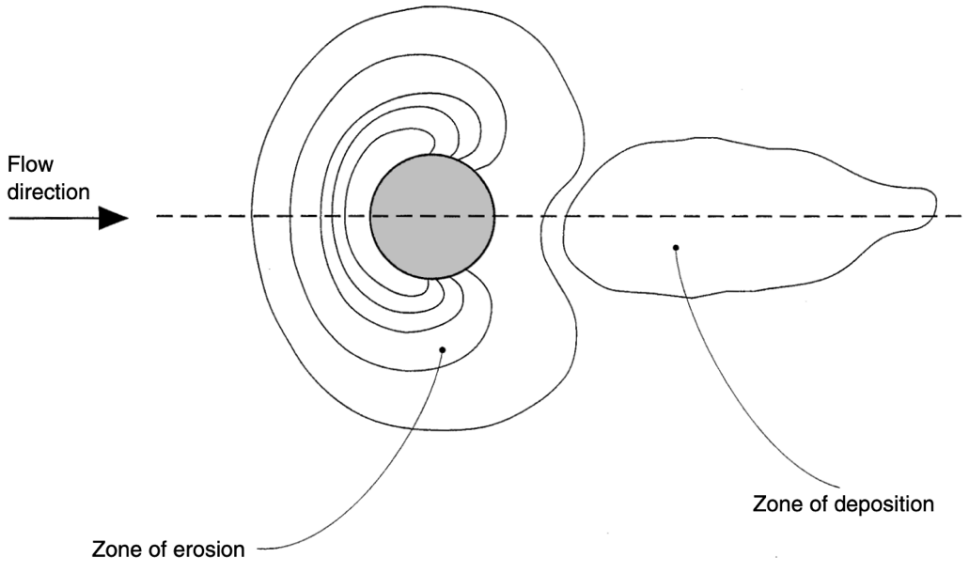


Figura 1 - Esquema da cavidade de erosão (Whitehouse, 1998)

A erosão localizada em pilares constitui uma das principais causas de rotura das pontes, para além de ter um peso significativo nos custos de construção e manutenção. Sendo um problema atual e global, é necessário aumentar a segurança deste tipo de estruturas, sendo, para isso, fundamental compreender o fenómeno de erosão localizada, caracterizar a respetiva cavidade de erosão e, acima de tudo, estudar o escoamento turbulento que está na sua origem.

Os primeiros estudos concentraram-se na estimativa da profundidade máxima de erosão, ajustando expressões matemáticas a resultados experimentais ou reais. No entanto, dada a complexidade da interação entre o escoamento, leito e estrutura, surgiram estudos baseados na modelação numérica e experimental, que permitem caracterizar de uma forma mais completa este fenómeno.

2.1 ESCOAMENTO EM TORNO DE UM PILAR SIMPLES

A presença de um pilar origina, nas suas imediações, alterações no campo de velocidades, intensidades turbulentas e tensões de Reynolds, sendo o escoamento bastante complexo mesmo no caso de pilares simples – coluna cilíndrica vertical. Quando o escoamento se aproxima da estrutura cria-se um efeito de estagnação, resultante da diminuição da velocidade até se anular na sua face de montante. Consequentemente, verifica-se um aumento de pressão, que será maior, quanto maior for a redução da velocidade, e que provoca um diferencial de pressões ao longo da face de montante do pilar. Esta alteração do campo de pressões origina um aumento do nível da superfície livre a montante do pilar e a formação uma superfície de enrolamento.

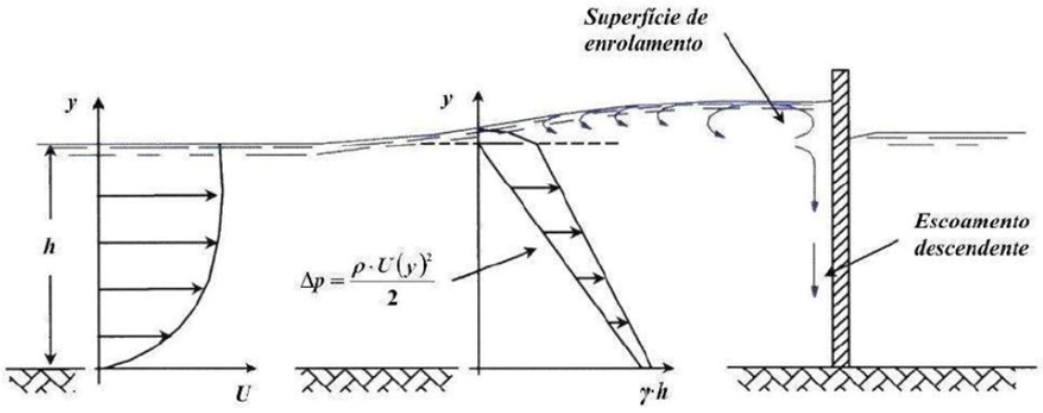


Figura 2 - Alteração do campo de pressões e escoamento a montante do pilar (Fael, 2007)

Simultaneamente, forma-se um escoamento descendente, parcialmente desviado quando atinge o leito, e a separação do escoamento junto ao leito, ligeiramente a montante do pilar e ao longo da superfície lateral do pilar. O escoamento descendente e a separação junto ao fundo originam a formação do vórtice em ferradura, que constitui o fenómeno mais importante na erosão localizada. A Figura 3 ilustra os principais fenómenos hidrodinâmicos que ocorrem em torno do pilar.

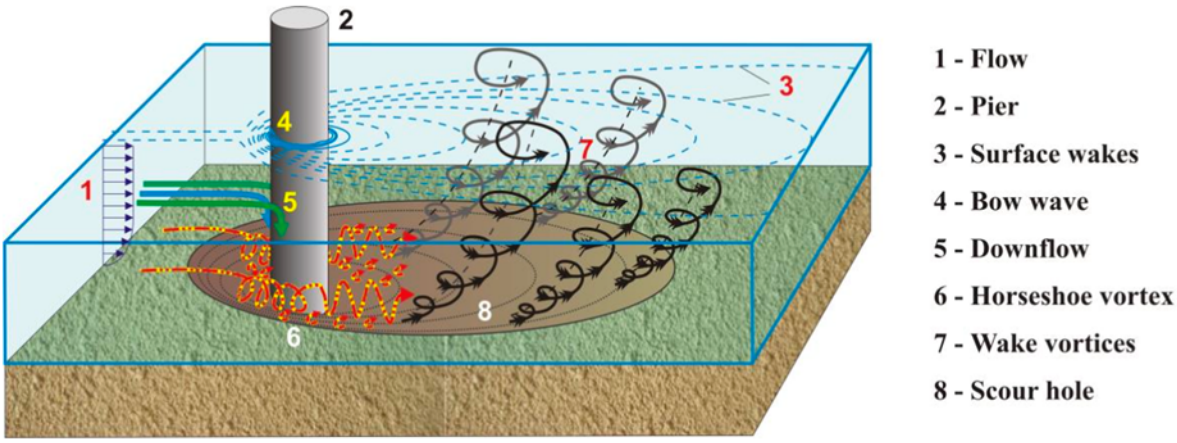


Figura 3 - Estruturas do Escoamento em Pilares Cilíndricos (Castiblanco, 2016)

À medida que o escoamento incidente se aproxima do pilar, o gradiente adverso de pressão provoca um aumento do nível da superfície livre a montante do pilar e a formação de rolo (superfície de enrolamento). Em simultâneo, força uma parte do escoamento a defletir para baixo ao longo da face montante do pilar, originando um escoamento descendente (*downflow*), com comportamento semelhante ao de um jato vertical (Figura 4). Quando este escoamento atinge o leito, é redirecionado na direção de montante e interage com o escoamento principal, originando a formação de um vórtice (Melville & Raudkivi, 1977). Este vórtice, resultado da rotação horizontal do escoamento de aproximação na zona da linha de estagnação, sofre deformação e estiramento em torno do pilar, assumindo uma forma tridimensional em forma de ferradura (*horseshoe vortex*), Figura 5. Na região do leito onde se forma o vórtice, desenvolve-se uma zona de rotação de sentido oposto levando à formação de um vórtice secundário, conforme visível na Figura 6.

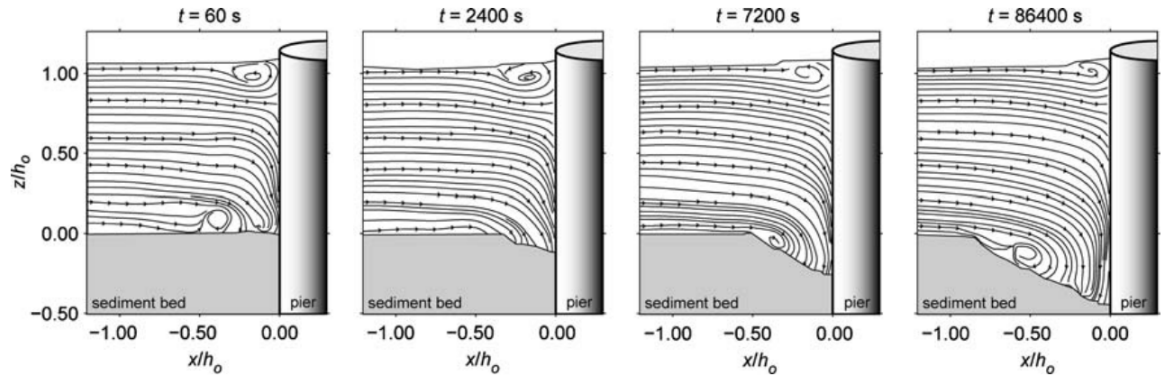


Figura 4 - Identificação da superfície de enrolamento e do escoamento descendente através das linhas de corrente (Unger & Hager, 2007)



Figura 5 - Visualização do Vórtice de Ferradura (Ramos, 2012; Ettema et al., 2017)

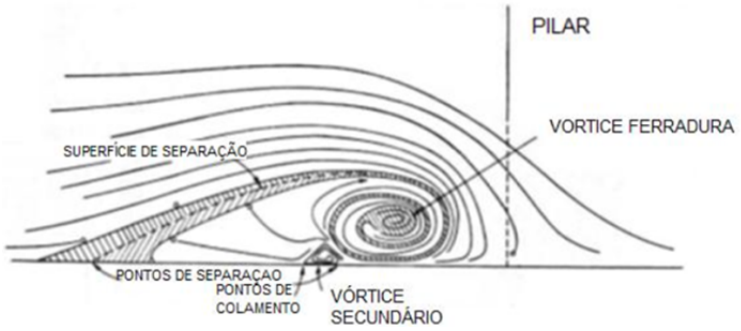


Figura 6 - Vórtice Secundário (Ramos, 2012)

Segundo Nielsen et al. (2011), o vórtice de ferradura é reconhecido como o mecanismo dominante responsável pela remoção dos sedimentos adjacentes à face frontal do pilar e, consequentemente, pelo desenvolvimento da cavidade de erosão. O seu prolongamento para jusante, até se dissipar, contribui para a turbulência do escoamento e para o seu papel ativo na erosão do fundo na zona a montante e a jusante do pilar.

A jusante do pilar, a separação do escoamento origina uma zona de esteira turbulenta onde se formam vórtices alternados, os vórtices de esteira (*wake vortices*), Figura 7, que intensificam localmente a capacidade de transporte de sedimentos (Sumer et al., 2013). A interação entre estes dois sistemas de vórtices estabelece um padrão cíclico de erosão que aprofunda progressivamente a cavidade provocada pela erosão até ser atingido um estado de equilíbrio dinâmico (Petersen et al., 2015).

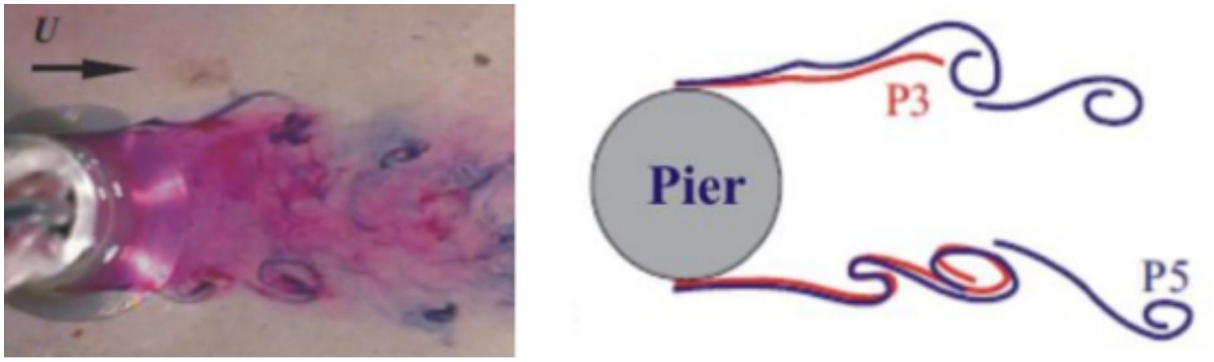


Figura 7 - Visualização dos Vórtices de Esteira (adaptado de Castiblanco, 2016)

A formação e o desprendimento dos vórtices são função do número de *Reynolds*, parâmetro adimensional que traduz a relação entre as forças viscosas e as forças de inércia:

$$Re = \frac{UD}{\nu} \tag{1}$$

onde D é o diâmetro do pilar, U é a velocidade média do escoamento de aproximação ao pilar e ν é a viscosidade cinemática da água.

Na Figura 8 apresenta-se um resumo dos diferentes padrões de desprendimento dos vórtices em função do número de *Reynolds*, apresentando-se, para cada gama deste parâmetro, um esquema com a esteira resultante, o regime de escoamento e uma breve descrição. De referir que a sepa-

ração do escoamento ocorre para valores de Re $>$ 55 e o desprendimento dos vórtices ocorre para Re $>$ 40.

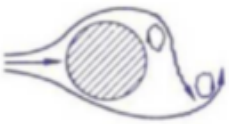
Re	Padrão	Regime	Observações
< 5		Regime sem separação	Não ocorre separação do escoamento e, portanto, não há formação de vórtices.
5 a 40		Um par de vórtices fixo	Surge um par de vórtices que tende a aumentar de comprimento em função do acréscimo no valor do número de *Reynolds*.
40 a 150		Desprendimento de vórtices com uma esteira laminar	Início do desprendimento com vórtices movendo-se, alternadamente, em sentido horário e anti-horário. Este padrão de esteira é conhecida como esteira de *Von Kármán*, que, nesta faixa de *Reynolds*, é laminar.
150 a 300		Transição à turbulência da esteira de vórtices	Ocorre a transição à turbulência da esteira de vórtices de *Von Kármán* e o surgimento das primeiras instabilidades tridimensionais.
300 a 3×10^5		Esteira de vórtices completamente turbulenta	Esteira completamente turbulenta, sendo que a camada limite sobre a superfície do cilindro permanece laminar.
3×10^5 a $3{,}5\times10^5$		Transição à turbulência da camada limite e esteira de vórtices é estreita e desorganizada	Início da transição à turbulência da camada limite e a esteira de vórtices torna-se mais estreita e desorganizada.
$>3{,}5\times10^6$		A esteira de vórtices é restabelecida	Restabelecimento de uma esteira de vórtices turbulenta.

Figura 8 - Variação do desprendimento dos vórtices em função do número de Reynolds (Pinto, 2008)

O número de *Strouhal*, St, descreve a frequência de desprendimento dos vórtices, f, normalizada com o diâmetro do pilar e com a velocidade média do escoamento de aproximação (Equação 2).

$$St = \frac{fD}{U} \tag{2}$$

Na Figura 9 apresenta-se o gráfico de variação do número de *Strouhal* de acordo com o número de *Reynolds*.

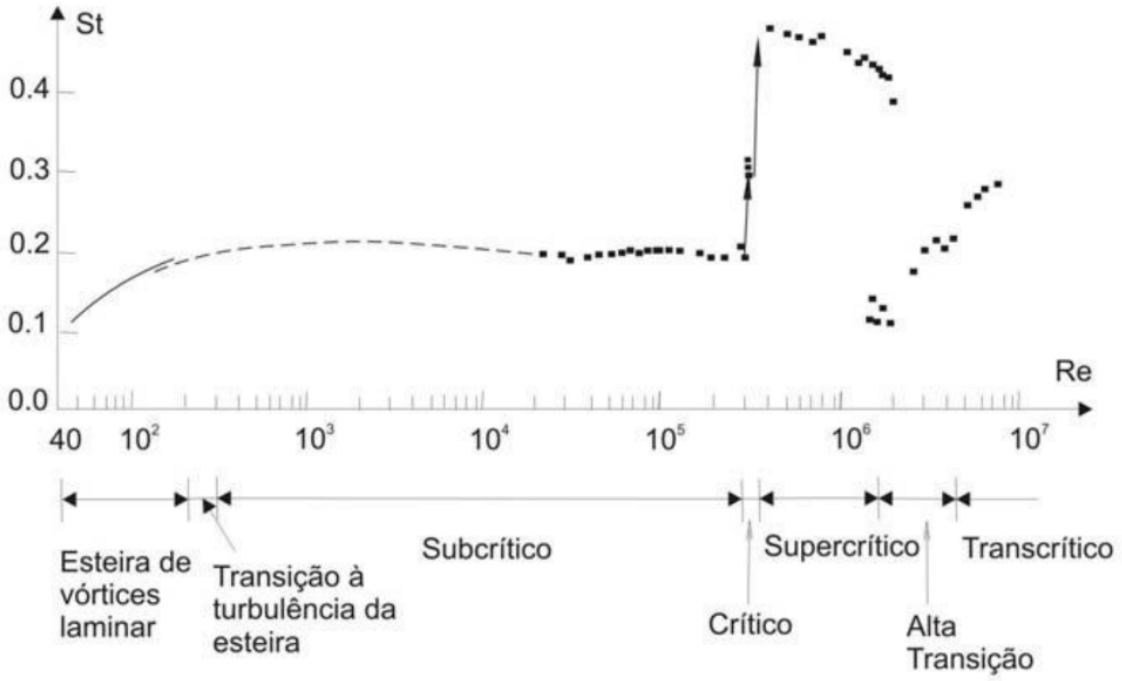


Figura 9 - Variação do desprendimento dos vórtices em função do número de *Reynolds* (Sumer & Fredsøe, 1997)

A interação entre o escoamento e o pilar origina forças hidrodinâmicas sobre o pilar, resultantes essencialmente da distribuição de pressões e das tensões viscosas ao longo da sua superfície. Estas forças podem ser decompostas em duas componentes principais: a força de arrastamento, F_D, que atua na direção longitudinal do escoamento, e a força de sustentação, F_L, que atua na direção transversal.

Para permitir a comparação entre diferentes condições de escoamento, estas forças são normalmente expressas através de coeficientes adimensionais. O coeficiente de arrastamento, C_D, quantifica a resistência oferecida pelo pilar ao escoamento na direção longitudinal, enquanto o coeficiente de sustentação, C_L, permite avaliar as forças transversais associadas à assimetria do escoamento e ao desprendimento alternado de vórtices na esteira. Assim, estes coeficientes constituem parâmetros relevantes para caracterizar a ação do escoamento sobre o pilar e interpretar a evolução temporal das forças obtidas em simulações numéricas.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_v} \tag{3}$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_h} \tag{4}$$

A área A_v corresponde à área projetada do pilar num plano perpendicular à direção do escoamento e a área A_h corresponde à área projetada horizontal do pilar, paralela à direção do escoamento.

2.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

O início do movimento dos sedimentos no leito, também conhecido como limiar de movimento, ocorre quando as forças motrizes exercidas pelo escoamento superam as forças estabilizadoras que mantêm os grãos em repouso (Soulsby, 1997). As principais forças envolvidas neste processo são: a força de arrastamento horizontal, F_D, e a força de sustentação vertical, F_L (Figura 10). Por outro lado, as forças estabilizadoras incluem o peso submerso das partículas de sedimento e as forças de atrito que operam entre os grãos (DeVos, 2008).

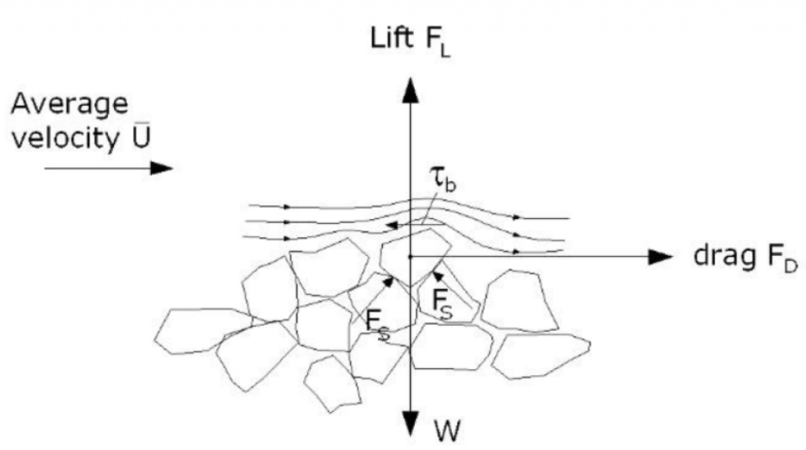


Figura 10 - Forças Atuantes num Grão de Sedimento (*DeVos, 2008*)

A tensão de corte no fundo, τ_b, expressa em N/m^2, calculada através da Equação 5, pode ser expressa como uma função da força de arrastamento horizontal, F_D e da área projetada do grão no plano horizontal, A^* (Chambel, 2019).

$$\tau_b = \frac{F_D}{A^*} \tag{5}$$

O início do movimento dos grãos do leito pode ser definido com base na tensão crítica de arrastamento, que representa a tensão tangencial mínima absoluta necessária para mobilizar as partículas. Existem vários métodos para determinação da tensão crítica de arrastamento, entre os quais se destaca o Método de *Shields* (Shields, 1936), que propôs a adoção de um parâmetro adimensional, Y_{cr}, cujo valor crítico define o limiar de movimento, em função da tensão crítica de arrastamento, τ_{cr}:

$$Y_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_s - \rho)d_s}, \tag{6}$$

onde g é a aceleração da gravidade, ρ_s é a massa volúmica dos sedimentos, ρ é a massa volúmica da água e d_s o diâmetro dos sedimentos.

O método de *Shields* é traduzido graficamente pelo denominado de Diagrama de *Shields*, que estabelece a relação entre o parâmetro adimensional, Y_{cr}, e o número de *Reynolds* associado aos

sedimentos, *Re**, Equação 7. Com base no gráfico, é possível determinar se um grão de sedimento com uma determinada tensão crítica e um determinado tamanho do grão vai ser mobilizado ou não.

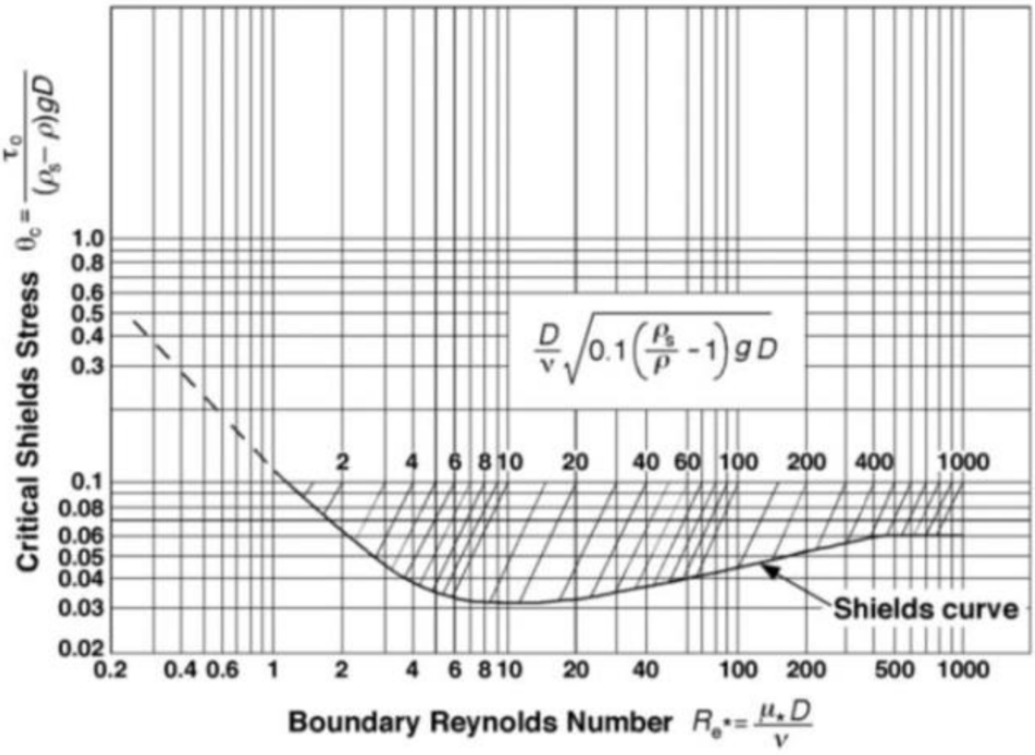


Figura 11 - Diagrama de Shields (Shields, 1936)

$$Re^* = u_* \frac{d_s}{\upsilon} \tag{7}$$

Como o Diagrama de *Shields* original constitui uma relação implícita entre as variáveis, (Soulsby, 1997) propôs uma adaptação amplamente utilizada (Figura 12) recorrendo ao conceito de tamanho de grão adimensional, D*, cuja determinação é feita com base na Equação 8.

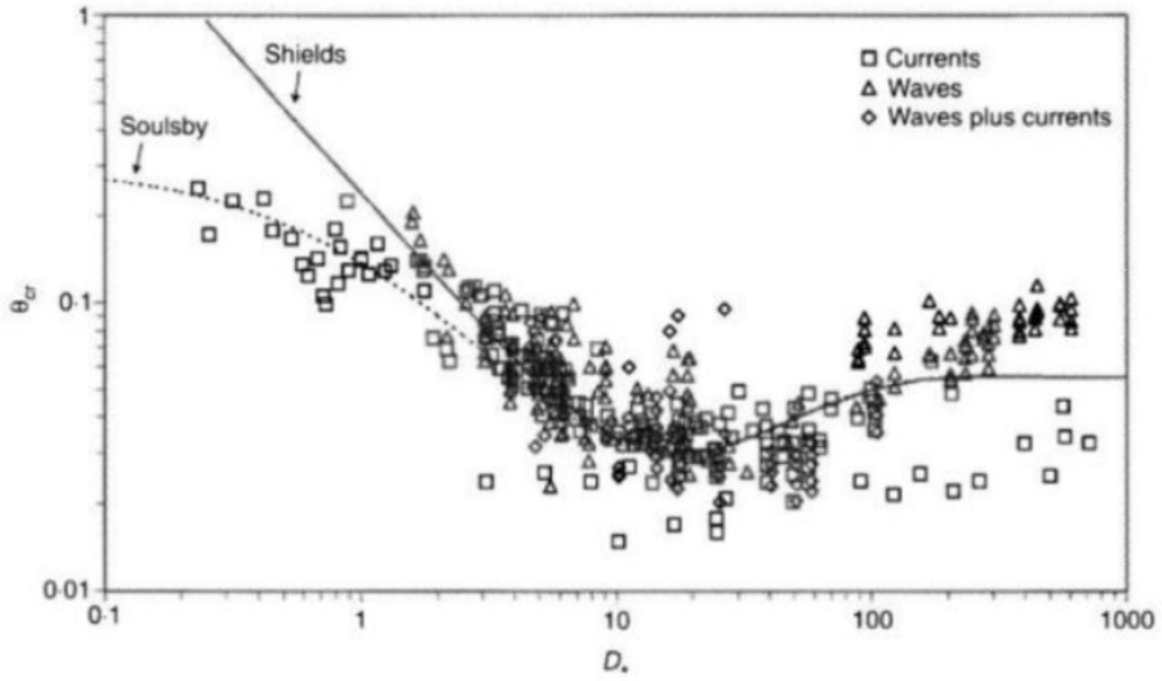


Figura 12 - Diagrama de Shields adaptado por Soulsby (Soulsby, 1997)

$$D^* = \left(\frac{g(s-1)}{v^2}\right)^{\frac{1}{3}} d_s \tag{8}$$

O desenvolvimento da erosão localizada em torno pilares está diretamente relacionado com o regime de transporte sedimentar no leito, sendo essencial distinguir entre as condições de *clear-water* e *live-bed,* com base na relação entre a tensão de arrastamento exercida pelo escoamento e o valor crítico necessário para a mobilização das partículas do leito.

No regime de *clear-water*, os sedimentos a montante da estrutura permanecem essencialmente imóveis, ou seja, não ocorre transporte sedimentar significativo. Neste caso, a tensão de arrastamento no leito é inferior ao valor crítico, verificando-se a condição $\tau < \tau_{cr}$. A erosão localizada desenvolve-se devido ao aumento da velocidade e da tensão de corte induzidos pela presença da estrutura, enquanto o leito circundante se mantém estável (Harris et al., 2010).

Por outro lado, no regime de *live-bed*, a tensão de arrastamento atinge ou ultrapassa o valor crítico ($\tau \geq \tau_{cr}$), originando transporte sedimentar contínuo em toda a área. Nestas condições, o movimento das partículas não se limita à zona adjacente à estrutura, ocorrendo ao longo de todo o leito. Como consequência, a erosão localizada tende a apresentar taxas mais elevadas e padrões de desenvolvimento distintos, resultantes da interação entre o escoamento e o transporte generalizado de sedimentos (Harris et al., 2010).

A Figura 13 compara a evolução temporal da profundidade de erosão nos dois regimes. Em condições de *live-bed*, o transporte generalizado de sedimentos faz com que a cavidade se desenvolva rapidamente, atingindo a profundidade de equilíbrio mais cedo face ao regime *clear-water* e, a partir desse instante, a profundidade oscila em torno de um valor médio. Num regime de *clear-water*, a erosão progride de forma assintótica e substancialmente mais lenta, aproximando-se do equilíbrio apenas ao fim de um período consideravelmente mais longo.

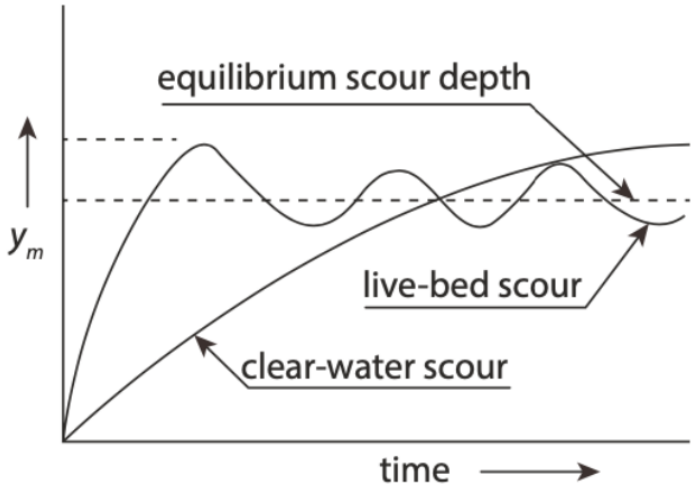


Figura 13 - Evolução da profundidade da cavidade de erosão em condições *clear-water* e *live-bed* *(Hoffmans & Verheij, 2021)*

A cavidade de erosão criada pela presença do pilar num curso de água é caracterizada por apresentar uma inclinação mais acentuada na face de montante, igual ao ângulo de atrito. Na face de jusante a inclinação é menor e, por isso, a cavidade de erosão apresenta um maior desenvolvimento a jusante do pilar. A profundidade máxima da cavidade de erosão ocorre no ponto imediatamente a montante do pilar.

O fenómeno de erosão localizada na proximidade dos pilares é condicionado por diferentes parâmetros associados às principais características do escoamento de aproximação, do fluído, dos sedimentos, do pilar e do canal, para além do tempo (Couto & Cardoso, 2001).

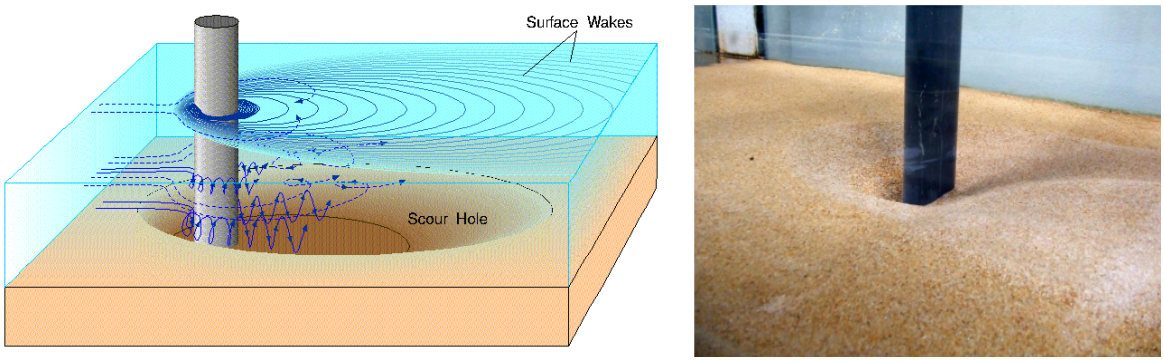


Figura 14 – Cavidade de erosão junto a pilares simples: a) esquema (Wikipédia); b) ensaio experimental (Pinheiro, 2010).

2.3 Modelação Numérica do Escoamento em Torno de Pilares

A Dinâmica de Fluídos Computacional, ou, na literatura inglesa, *CFD - Computational Fluid Dynamics*, tem vindo a ter um papel cada vez mais importante relativamente ao estudo dos comportamentos dos fluídos, mais precisamente, no estudo do escoamento em torno de pilares. A presença de um pilar num escoamento de superfície livre provoca a formação de estruturas turbulentas, nomeadamente, os vórtices em ferradura, os vórtices de esteira e o escoamento descendente, cuja medição experimental é particularmente complexa e morosa, devido à necessidade de medições detalhadas e ao elevado volume de dados a processar, especialmente no interior de cavidades de erosão. Neste contexto, os modelos numéricos de CFD possibilitam obter outras perspetivas para além dos ensaios experimentais, fornecendo informação mais detalhada acerca de diversos aspetos, tais como: campos de velocidade, vorticidade, tensões no leito e turbulência.

Entre os trabalhos mais importantes nesta área, destacam-se o de Roulund et al., (2005), no qual foi desenvolvida uma investigação numérica e experimental do escoamento em torno de um pilar cilíndrico sujeito a uma corrente permanente. Foi utilizado um modelo tridimensional de turbulência k-ω para fecho e foram também realizadas medições experimentais de velocidade

e de tensão no leito para validação de resultados. O estudo analisou a formação dos vórtices em ferradura, os vórtices de esteira e a amplificação da tensão no fundo em diferentes condições de camada limite, número de *Reynolds* e rugosidade do leito. Simultaneamente, foi também introduzido uma formulação morfológica, permitindo simular a evolução da cavidade de erosão em solos não coesivos. Apesar do foco principal incidir na evolução da cavidade de erosão no leito, este estudo é particularmente relevante para a presente dissertação pois demonstra que a modelação numérica permite reproduzir os principais mecanismos hidrodinâmicos responsáveis pela erosão localizada em pilares.

Md Nazmus Sakib (2013) realizou um trabalho cujo tema é de grande relevância para o presente estudo, incidindo na simulação do escoamento de superfície livre em torno de um pilar numa cavidade de erosão. O autor aplicou um modelo numérico tridimensional baseado em malha, recorrendo às equações *RANS* e ao fecho *k-ω,* tendo, nas proximidades do pilar e no fundo refinado as malhas com o objetivo de detalhar com mais pormenor o comportamento do escoamento nessas zonas. Com base nos resultados obtidos, foi possível identificar os diferentes fenómenos: o escoamento descendente na face montante do pilar, os vórtices na base da cavidade e também movimentos turbulentos na região de esteira. Além disso, as previsões de tensões no leito e de turbulência revelaram ser bastante próximas das dos ensaios experimentais, evidenciando o uso de *CFD* como uma ferramenta essencial para complementar a prática experimental.

No contexto nacional, Ramos et al., (2014) desenvolveu uma simulação numérica de um escoamento em torno de um pilar com recurso ao *OpenFOAM*, tendo sido considerado neste trabalho duas configurações com fundo fixo: uma com fundo plano, representativa da fase inicial do processo e outra com fundo erodido, correspondendo a uma geometria de equilíbrio obtida experimentalmente. Neste estudo, foi aplicado o modelo de turbulência *LES* (*Large Eddy Simulation*) e posteriormente analisados os campos de velocidade, vorticidade, tensão no fundo e coeficiente de arrasto. Os autores evidenciaram também a importância de utilizar uma malha com maior definição, principalmente em geometrias de zonas erodidas nas quais a irregularidade do fundo torna o processo de discretização mais exigente.

A principal contribuição deste trabalho consiste na demonstração da eficácia do *OpenFOAM* na análise tridimensional do escoamento em torno de pilares integrando configurações com uma

cavidade de erosão localizada. Embora os autores tenham enfrentado dificuldades em identificar de forma clara o vórtice em ferradura em alguns resultados, observaram perturbações significativas na zona da cavidade como também uma melhoria na representação dos vórtices de esteira. Com base neste estudo, concluiu-se que a simulação de escoamentos desta tipologia depende não só do modelo de turbulência adotado como também da qualidade da malha e da representação geométrica da cavidade.

Em 2021, *Helmi & Shehata* (2021) utilizaram um modelo *CFD* de modo a analisar a variação das estruturas do escoamento e da tensão de corte junto ao leito durante o desenvolvimento da erosão localizada em torno de um pilar cilíndrico. Foram analisados diferentes modelos de turbulência, tendo sido escolhido o modelo k-ω pela sua precisão em capturar das oscilações e desprendimento de vórtices com recursos computacionais acessíveis. A pesquisa realizada baseou-se em sete geometrias fixas da cavidade de erosão, correspondentes a diferentes fases de desenvolvimento observadas em trabalhos experimentais. Os autores analisaram grandezas como: velocidade longitudinal, velocidade vertical, circulação, vorticidade e tensão no fundo, concluindo que o vórtice em ferradura tende a deslocar-se para o interior da cavidade e a ficar progressivamente confinado pela sua geometria. Esta abordagem é relevante uma vez que permite dissociar a análise hidrodinâmica da evolução sedimentar propriamente dita, tratando cada fase da cavidade como uma configuração fixa a ser estudada numericamente.

O trabalho de *Unglehrt* et al., (2022) focou-se na utilização de um novo método de volume finito de células cortadas (*cut cells*) para realizar simulações de grandes escalas (*LES*) do escoamento no interior de uma cavidade de erosão localizada em torno de um cilindro vertical. A metodologia utilizada focou-se na preservação da simetria e conservação da energia, tendo sido posteriormente validada por medições experimentais de Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV). Os resultados obtidos demonstraram que a topologia do sistema de vórtices em ferradura possui uma forte dependência da resolução da malha, alcançando uma boa concordância com dados experimentais nas malhas mais finas. Além disso, os autores concluíram que, para números de *Reynolds* de 20 000 e 40 000, foi possível obter soluções próximas da convergência, embora com custos computacionais bastante elevados. Um resultado especialmente relevante é a sensibilidade da topologia do vórtice em ferradura à resolução da malha, reforçando a necessidade de refinamento adequado sempre que o objetivo passa por analisar estruturas turbulentas de alta complexidade.

Mais recentemente, *Kalidindi & Khosa* (2024) utilizaram o modelo de turbulência *LES* para estudar a evolução de estruturas coerentes no escoamento em torno de um pilar cilíndrico com cavidades correspondentes a diferentes fases de desenvolvimento. Os autores optaram por introduzir no domínio numérico geometrias de cavidades obtidas previamente na literatura, recriando o escoamento em diferentes estados do leito ao invés de simular diretamente a evolução dos sedimentos. Deste modo foi possível analisar a formação de vórtices secundários dentro da cavidade e a sua interação com o vórtice principal, mostrando que o sistema de vórtices em ferradura apresenta uma dinâmica altamente complexa. O estudo identificou ainda variações de pressão significativas no núcleo do vórtice, oscilações aperiódicas bimodais e valores elevados de tensão no leito sob o vórtice em ferradura, os quais diminuem com o aumento da profundidade da cavidade.

Este trabalho é particularmente importante para a presente dissertação uma vez que reforça a ideia de que a geometria erodida não é apenas uma consequência do escoamento, mas passa também a condicionar os padrões de escoamento. À medida que a cavidade se desenvolve, a posição, dimensão e interação dos vórtices alteram-se, modificando as zonas de maior turbulência e de maior solicitação junto ao leito. Assim, a análise de diferentes configurações fixas de leito constitui uma abordagem válida para melhor compreender a evolução hidrodinâmica associada ao desenvolvimento da erosão localizada, mesmo quando o transporte sedimentar não é simulado diretamente.

Por fim, *Gilletta et al*., (2025) apresenta uma das contribuições mais recentes no domínio da modelação da turbulência aplicada a escoamentos em torno de cilindros emergentes de um leito sedimentar. Os autores compararam diferentes abordagens de turbulência, incluindo *RANS*, *LES* e modelos híbridos *RANS/LES*, utilizando o *OpenFOAM* e, posteriormente, o *sedFOAM*. O estudo demonstrou que os modelos híbridos podem representar com maior detalhe a dinâmica do vórtice em ferradura e dos vórtices de esteira do que modelos *RANS* tradicionais, com menor custo computacional do que uma simulação *LES* totalmente resolvida. Em particular, os modelos híbridos revelaram ser capazes de reproduzir oscilações bimodais do vórtice em ferradura, fenómeno considerado relevante para a compreensão da interação entre o escoamento e o leito.

A importância deste estudo reside no facto de evidenciar uma tendência atual da investigação *CFD*: procurar um equilíbrio entre o rigor físico e a viabilidade computacional. Embora a *LES*

permita uma representação mais detalhada das estruturas turbulentas, o seu custo continua elevado para aplicações extensas ou paramétricas. Por outro lado, os modelos *RANS* são mais económicos, no entanto podem não captar da forma mais adequada a dinâmica não estacionária do vórtice em ferradura e de esteira. Os modelos híbridos surgem então como uma alternativa promissora para estudos em que seja necessário representar os principais mecanismos turbulentos sem tornar a simulação demasiado pesada do ponto de vista computacional.

De uma forma geral, os estudos analisados mostram que a aplicação da Dinâmica de Fluidos Computacional ao escoamento em torno de pilares evoluiu de modelos tridimensionais focados na previsão média do campo hidrodinâmico para abordagens cada vez mais capazes de representar estruturas turbulentas complexas. Os trabalhos com cavidades de erosão localizada fixas são particularmente relevantes para esta dissertação pois permitem estudar a influência da geometria do leito no escoamento sem introduzir, numa primeira instância, a complexidade adicional do transporte sedimentar. Deste modo, a análise de velocidades, vorticidade, tensões no fundo, energia cinética turbulenta e zonas de recirculação constitui uma etapa essencial para compreender os mecanismos condicionantes da erosão localizada em torno de pilares.

Neste contexto, a presente dissertação surge como um complemento ao trabalho realizado até à atualidade no que diz respeito ao estudo do escoamento em torno de pilares, contribuindo para aprofundar a compreensão dos fenómenos hidrodinâmicos associados à presença de um obstáculo e à geometria do leito. Ao considerar diferentes configurações do leito, incluindo situações com leito erodido, este trabalho permite analisar de que modo a morfologia do fundo influencia os campos de velocidade, as zonas de recirculação e os vórtices na proximidade do pilar. Assim, embora o foco do presente trabalho não incida diretamente na cavidade de erosão e na sua evolução temporal, as simulações numéricas realizadas constituem um complemento científico à análise dos mecanismos do escoamento que têm interferência direta no processo erosivo.

3 MODELAÇÃO NUMÉRICA DE FLUÍDOS

3.1 INTRODUÇÃO À DINÂMICA DE FLUÍDOS COMPUTACIONAL

A Dinâmica de Fluídos Computacional, designada frequentemente por *CFD*, do inglês *Computational Fluid Dynamics*, corresponde a uma área da Mecânica dos Fluidos cujo objetivo assenta no estudo do comportamento dos diferentes fluídos por meio da resolução numérica das equações que governam o seu movimento. Esta abordagem recorre a métodos computacionais para representar, de forma aproximada, grandezas como a velocidade, pressão, turbulência e evolução da superfície livre, permitindo analisar fenómenos que, devido à elevada complexidade, seriam difíceis de descrever apenas através das formulações teóricas existentes.

Nas últimas décadas, a utilização de *CFD* no âmbito da hidráulica tem vindo a crescer de forma significativa, servindo-se do aumento da capacidade crescente de processamento dos computadores e da evolução das diferentes ferramentas numéricas cada vez mais robustas. É importante referir que esta metodologia não representa uma alternativa à modelação física experimental, que continua a desempenhar um papel essencial na validação de resultados, sendo antes um complemento muito útil à modelação física.

A aplicação de uma metodologia *CFD* a problemas de simulação de fluidos apresenta diversas vantagens, entre as quais:

- Redução do tempo e do custo associados à realização de ensaios em modelo físico;
- Maior facilidade na alteração dos parâmetros de entrada entre simulações, permitindo testar um maior número de cenários num período de tempo mais reduzido;
- Obtenção de informação em todo o domínio de cálculo;

- Melhor visualização e personalização dos resultados.

A simulação numérica de escoamentos exige também uma compreensão adequada dos diferentes fenómenos físicos envolvidos uma vez que estes condicionam a definição do problema e as opções adotadas no modelo, nomeadamente as condições de fronteira e os modelos numéricos utilizados. Paralelamente, é necessário compreender os princípios de funcionamento da metodologia *CFD* de modo a garantir uma aplicação coerente e uma interpretação crítica dos resultados obtidos. Deste modo, são apresentados de seguida, os princípios fundamentais da modelação numérica de fluídos (Ferziger et al., 2020):

- Consistência: a solução deve-se tornar mais precisa à medida que aumenta o refinamento da malha utilizada;
- Estabilidade: os erros gerados durante o cálculo não devem aumentar nem comprometer os resultados obtidos;
- Convergência: a solução numérica deve aproximar-se de um valor final estável;
- Precisão: os resultados devem representar o escoamento com um nível de erro aceitável, tendo em consideração os erros que possam surgir;
- Conservação: o processo de cálculo deve respeitar as leis de conservação da massa, da quantidade de movimento e, quando aplicável, da energia.

Neste contexto, a aplicação da metodologia *CFD* exige a formulação matemática dos princípios físicos que regem o escoamento, os quais são expressos através das equações governativas apresentadas no subcapítulo 3.2.

3.2 Equações Governativas

A modelação numérica de escoamentos baseia-se na resolução das equações que traduzem os princípios fundamentais da Mecânica dos Fluidos. Estes princípios correspondem à conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia. No entanto, considerando que o presente estudo incide sobre um escoamento de superfície livre sem fenómenos térmicos relevantes, a formulação numérica adotada centrar-se-á na conservação da massa e da quantidade de movimento, complementada pela determinação da interface entre a água e o ar.

A simulação numérica do caso em estudo será realizada com recurso ao modelo *interFoam,* integrado no *OpenFOAM*, que resolve as equações abaixo apresentadas (7 a 9). Este modelo é utilizado para a simulação transitória de dois fluidos incompressíveis, isotérmicos e imiscíveis, recorrendo ao método *Volume of Fluid* (*VoF*) para determinar a interface entre as duas fases. No caso em estudo, estas fases correspondem à água e ao ar, sendo a superfície livre determinada a partir da fração volumétrica ocupada por cada fluido em cada célula da malha computacional.

A escolha do modelo *interFoam* deve-se à sua adequação ao tipo de escoamento analisado na presente dissertação. Uma vez que o estudo incide sobre um escoamento com superfície livre em torno de um pilar, é necessário representar simultaneamente a água, o ar e a interface entre as duas fases. Para além disso, a consideração de um leito estático torna desnecessária a utilização de modelos de transporte sedimentar ou de atualização morfológica do fundo, permitindo concentrar a análise na caracterização hidrodinâmica do escoamento, nomeadamente nos campos de velocidade e pressão, nas zonas de recirculação e nas estruturas turbulentas formadas junto ao pilar.

A Equação 9 corresponde à equação da continuidade para um escoamento incompressível e traduz o princípio da conservação da massa. Nesta formulação, o operador vetorial nabla (∇), aplicado ao vetor velocidade ($\vec{V}$), representa a divergência do campo de velocidades. O facto de esta divergência ser nula significa que, em cada volume de controlo, o volume de fluido que entra é igual ao volume que sai, não ocorrendo acumulação ou perda de massa no interior do domínio.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{9}$$

A Equação 10 representa a conservação da quantidade de movimento, sendo baseada nas equações de *Navier-Stokes* adaptadas à formulação utilizada pelo modelo *interFoam*. Esta equação permite descrever o movimento do fluido considerando os efeitos da variação temporal da velocidade, do transporte do escoamento, da pressão, da gravidade, da viscosidade e da tensão superficial existente na interface entre a água e o ar. A equação é composta por diferentes pa-

râmetros: a densidade (ρ); o tempo (t); a pressão pseudo-dinâmica (p^*); a aceleração gravítica ($\vec{g}$); o vetor posição ($\vec{X}$); a viscosidade cinemática do fluido e a viscosidade turbulenta (μ e μ_t, respetivamente); o tensor de deformações (S) e a força de tensão superficial ($\vec{F}_\sigma$) (Sassetti Mendes, 2021).

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{V} \vec{V}\right) = -\nabla p^* - \left(\vec{g} \cdot \vec{X}\right)\nabla \rho + \nabla \cdot (2(\mu + \mu_t)S) + \vec{F}_\sigma \tag{10}$$

A força de tensão superficial, representada por $\vec{F}_\sigma$, é definida pela Equação 11 e atua na interface entre a água e o ar. Nesta expressão, σ corresponde ao coeficiente de tensão superficial, κ representa a curvatura da interface. α corresponde à fração volumétrica utilizada para distinguir as duas fases no domínio computacional através do método *Volume of Fluid* (*VoF*), que indica a fração de água existente em cada célula da malha. Quando $\alpha = 1$, a célula encontra-se totalmente preenchida por água, quando $\alpha = 0$, encontra-se preenchida por ar e quando $0 < \alpha < 1$, a célula pertence à região de interface entre os dois fluidos (Tabela 1).

$$\vec{F}_\sigma = \sigma \kappa \nabla \alpha \tag{11}$$

Tabela 1 - Valores da fração de fase (VoF)

$\boldsymbol{\alpha = 0}$	Célula totalmente preenchida por ar
$\alpha = 1$	Célula totalmente preenchida por água
$0 < \alpha < 1$	Célula pertencente à região de interface dos dois fluidos

A Equação 12, referente ao transporte da fração volumétrica α, descreve a evolução da fase líquida no domínio computacional ao longo do tempo. Nesta equação, o termo $\frac{d\alpha}{dt}$ representa a variação temporal da fração de água, o termo convectivo $\nabla \cdot \vec{V}\alpha$ traduz o transporte dessa fração pelo campo de velocidades do escoamento e o termo $\nabla \cdot \vec{V}_{ic}\alpha(1-\alpha)$ corresponde a uma com-

pressão artificial da interface, introduzida para reduzir a sua dispersão numérica e manter uma transição mais definida entre ambas as fases.

$$\frac{d\alpha}{dt} + \nabla \cdot \vec{V}\alpha + \nabla \cdot \vec{V}_{ic}\alpha(1-\alpha) = 0 \tag{12}$$

A Equação 13 define a velocidade de compressão da interface, $\vec{V}_{ic}$, utilizada no termo adicional da equação de transporte da fração volumétrica. Nesta expressão, C_α corresponde ao coeficiente de compressão da interface, $|\vec{V}|$ representa o módulo da velocidade do escoamento e $\frac{\nabla\alpha}{|\nabla\alpha|}$ indica a direção normal à interface entre as fases. Este termo não representa uma velocidade física adicional do escoamento, tendo apenas a função numérica de manter a interface ar–água mais definido durante a simulação.

$$\vec{V}_{ic} = C_\alpha |\vec{V}| \frac{\nabla\alpha}{|\nabla\alpha|} \tag{13}$$

De um modo geral, o modelo numérico calcula a evolução das variáveis do escoamento ao longo do tempo, determinando a sua variação em relação ao instante anterior com base nas condições iniciais e nas condições de fronteira impostas.

3.3 MODELOS DE TURBULÊNCIA

A turbulência é uma característica de elevada importância na análise de escoamentos, representando as flutuações da velocidade no tempo. Relativamente a casos de escoamentos em torno de pilares, esta componente assume particular relevância uma vez que está diretamente associada à formação de instabilidades nas zonas de recirculação, nos vórtices, na esteira e no aumento das tensões de arrastamento máximas junto do leito. Deste modo, a correta representação da turbulência é um aspeto fundamental na modelação *CFD*, sobretudo quando se pretende analisar escoamentos tridimensionais complexos.

A resolução direta da turbulência através das equações de *Navier-Stokes* seria, em teoria, a forma mais completa de representar o escoamento. No entanto, esta abordagem exige recursos computacionais extremamente elevados e dispendiosos, sendo impossível de aplicar a problemas de engenharia com geometrias complexas e números de Reynolds elevados. Por esse motivo, em aplicações práticas de *CFD* são utilizados modelos de turbulência que permitem representar, de forma aproximada, as flutuações turbulentas sobre o escoamento médio.

Assim, é possível agrupar em três grupos distintos os diferentes modelos de resolução das equações numéricas de *Navier-Stokes (Wendt, 2009)*:

- *RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes*;
- *LES - Large Eddy Simulation*;
- *DNS - Direct Numeric Simulation*.

3.3.1 Modelos Baseados nas Equações RANS

Conforme já mencionado, os escoamentos turbulentos caracterizam-se por flutuações de velocidade no tempo, cuja resolução direta é realizada através das equações de *Navier-Stokes*, que permite obter informação detalhada sobre o escoamento, mas exige recursos computacionais muito elevados, tornando o processo bastante demorado e dispendioso. Desse modo, é comum recorrer-se frequentemente às equações *RANS* (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) que permitem a resolução de escalas de turbulência mais abrangentes (Wendt, 2009).

As equações *RANS* são obtidas através da aplicação de uma média temporal às equações de *Navier–Stokes*. Em coordenadas cartesianas, podem ser expressas da seguinte forma (Azevedo, 2011):

$$\textit{Conservação da Massa:} \qquad \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho\overline{U_i}\right) = 0 \tag{14}$$

$$\textit{Quantidade de Movimento:} \qquad \frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\overline{U_i}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\overline{U_i U_j}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu\frac{\partial^2\overline{U_i}}{\partial x_i \partial x_j} - \rho\overline{u_i{}' u_j{}'} \tag{15}$$

Nos modelos *RANS*, o termo adicional $\left(-\rho\overline{u_i{}'u_j{}'}\right)$ representa as tensões de Reynolds associadas às flutuações turbulentas da velocidade. Como estas tensões introduzem novas incógnitas no sistema de equações, é necessário recorrer a modelos de turbulência para as representar, sendo os modelos mais utilizados os seguintes:

- $k-\varepsilon$;
- $k-\omega$;
- $k-\omega$ (*SST – Shear Stress Transport*).

3.3.1.1 Modelo Standard $k-\varepsilon$

O modelo $k-\varepsilon$, inicialmente desenvolvido por *Brian Launder* e *Dudley Spalding* em 1972 (1974), é um dos modelos de turbulência mais simples e mais utilizados em aplicações de *CFD*. Trata-se de um modelo semi-empírico, baseado na resolução de duas equações de transporte: uma para a energia cinética turbulenta (Equação 16) e outra para a taxa de dissipação da energia turbulenta (Equação 17). A partir destas duas grandezas é possível caracterizar as propriedades turbulentas do escoamento e assim conseguir calcular a viscosidade turbulenta. Este modelo pode, ainda, ser apresentado através de três submodelos: *Standard*, *RNG* (*Renormalization*) e *Realizable*.

$$k=\frac{3}{2}(U\times I)^2 \tag{16}$$

$$\varepsilon=\frac{C_\mu k^2}{\nu_T} \tag{17}$$

O submodelo *Standard* é amplamente utilizado devido à sua robustez e simplicidade, apresentando bom desempenho em diversos escoamentos turbulentos. No entanto, pode apresentar li-

mitações quando aplicado a escoamentos mais complexos, nomeadamente em situações com elevados gradientes de pressão, curvaturas acentuadas ou separação do escoamento.

O submodelo *RNG* é mais adequado para escoamentos sujeitos a fortes tensões de corte, presença de vórtices e zonas de transição local, permitindo uma representação mais ajustada de fenómenos turbulentos complexos.

Por fim, o submodelo *Realizable* apresenta vantagens semelhantes às do RNG, sendo igualmente indicado para escoamentos com maior complexidade. A sua principal vantagem prende-se com a possibilidade de alcançar uma convergência mais rápida e estável em determinadas aplicações.

Em suma, este modelo apresenta um bom desempenho no que diz respeito à simulação de escoamentos completamente turbulentos, nos quais os efeitos viscosos moleculares são pouco significativos quando comparados com os efeitos associados ao movimento turbulento (Launder & Spalding, 1974). Contudo, apesar da sua robustez e vasta utilização, este modelo apresenta algumas limitações em escoamentos mais complexos, em particular, pode não ser o mais adequado para situações com separação da camada limite, variações bruscas da taxa de deformação, escoamentos rotacionais ou geometrias com superfícies curvas, nas quais a estrutura da turbulência se torna mais difícil de representar corretamente (Abrunhosa, 2003).

3.3.1.2 Modelo $k-\omega$

O modelo $k-\omega$ teve origem nos trabalhos de *Kolmogorov (1942)*, tendo sido proposto em 1942. Este incluía uma equação diferencial para a resolução de k e outra para a resolução de ω, sendo o parâmetro ω definido como a dissipação de energia por unidade de volume e tempo. A formulação atual tem por base o trabalho desenvolvido por *Saffman (1970),* no qual foi proposta uma nova abordagem para a modelação da turbulência, e, desde então, este modelo tem sido alvo de sucessivos alterações e melhorias. O parâmetro ω pode ser considerado uma frequência característica do processo de decaimento da turbulência.

Em 1988, *Saffman* e *Wilcox (1974)* apresentaram uma versão alternativa onde a taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta é substituída por $\omega = \varepsilon/k$, em que a viscosi-

dade turbulenta se supõe que esteja associada à energia cinética turbulenta, k, e à taxa de dissipação específica, ω, pela seguinte relação (Menter, 1992):

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \tag{18}$$

O modelo $k - \omega$ apresenta um bom desempenho na representação do escoamento junto às paredes, sendo adequado para simulações com números de *Reynolds* baixos e, por este motivo, pode ser mais preciso nesta região do que o modelo *standard* $k - \varepsilon$. No entanto, a sua aplicação pode apresentar limitações em zonas mais afastadas da parede devido à maior sensibilidade às condições do escoamento exterior. Para ultrapassar esta limitação, *Menter* (1992) propôs o modelo *Shear-Stress Transport* (*SST*) abordado no subcapítulo 3.3.1.3.

3.3.1.3 Modelo Shear-Stress Transport $k - \omega$

Menter (1994) apresentou um novo modelo de turbulência baseado no modelo $k - \omega$ de *Kolmogorov,* com o qual conjuga as vantagens do modelo $k - \varepsilon$, criado por *Brian Launder* e *Dudley Spalding.* Deste modo, serve-se dos atributos do modelo $k - \omega$ relativamente ao tratamento junto da fronteira do obstáculo e utiliza o $k - \varepsilon$ na região externa do escoamento, constituindo assim dois conjuntos de equações de transporte (Blazek, 2001). Assim, este modelo permite estimar de forma mais adequada o início e a extensão da separação do escoamento em situações com gradientes de pressão adversos, ao incorporar os efeitos de transporte na formulação da viscosidade turbulenta (Abrunhosa, 2003).

3.3.2 LES - Large Eddy Simulation

Inicialmente proposto por *Joseph Smagorinsky,* (1963)*,* os modelos *LES* baseiam-se na resolução das equações de *Navier-Stokes.* Esta metodologia parte do princípio de que os movimentos nas menores escalas tendem a ser mais homogéneos e isotrópicos e, desse modo, não são tão afetados pelas condições de fronteira como acontece com escalas de maior dimensão. Segundo

Keylock et. al. (2012), os modelos *LES* permitem obter uma representação mais detalhada do escoamento face aos modelos *RANS*, uma vez que resolvem diretamente as estruturas turbulentas de maior escala, o que constitui uma vantagem relevante na análise de escoamentos complexos, permitindo uma melhor caracterização de grandes vórtices e dos processos associados ao transporte de sedimentos.

Comparativamente aos modelos *DNS* (que serão abordados no subcapítulo 3.3.3), a metodologia *LES* apresenta a vantagem de poder ser aplicada a escoamentos com números de Reynolds mais elevados (Piomelli, 2004), uma vez que resolve diretamente apenas as estruturas turbulentas de maior dimensão e maior conteúdo energético. As escalas menores, por sua vez, não são resolvidas de forma explícita, sendo representadas através de um modelo submalha (Bortoli, 2000). Este modelo apresenta ainda um custo computacional inferior, uma vez que não exige a resolução direta dos vórtices de menor dimensão presentes no campo de escoamento (Anderson, 1995).

Apesar das suas vantagens, os modelos *LES* apresentam como principal limitação a necessidade de utilizar malhas mais refinadas, sobretudo em regiões próximas de obstáculos. As tensões de corte de Reynolds são determinadas pelas grandes escalas de turbulência. As simulações necessitam ser realizadas de modo que o maior contributo para as tensões de corte seja por parte vórtices resolvidos (Bortoli, 2000).

3.3.3 DNS – Direct Numeric Simulation

A abordagem através de um modelo *DNS* consiste em resolver diretamente as equações de *Navier-Stokes*, sem recorrer a qualquer tipo de modelação da turbulência nem a processos de média. As únicas aproximações introduzidas são as inerentes à própria discretização numérica, cujo erro é passível de ser quantificado e controlado. Desta forma, o escoamento é descrito na sua totalidade, exigindo que todas as escalas de movimento, tanto temporais como espaciais, sejam explicitamente calculadas (Azevedo, 2011), o que se traduz num custo computacional consideravelmente elevado (Piomelli, 2004).

Para que os resultados obtidos sejam fisicamente representativos, o domínio de cálculo deve ter dimensão suficiente para acomodar as maiores estruturas turbulentas do escoamento, sendo

igualmente indispensável que a malha seja suficientemente refinada para captar os processos de dissipação de energia cinética. Uma vez que a turbulência abrange um espectro de energia muito alargado, satisfazer simultaneamente estes dois requisitos torna-se extremamente exigente do ponto de vista computacional. Por esta razão, os modelos *DNS* revelam uma aplicabilidade bastante limitada relativamente escoamentos com números de *Reynolds* baixos, excluindo assim a grande maioria das situações de interesse prático (Martinez, 2006).

3.4 MÉTODOS PARA DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL

A discretização espacial das equações governativas consiste na transformação das mesmas num sistema de equações algébricas para as variáveis do problema, calculadas em localizações discretas no espaço e no tempo. Entre os métodos numéricos disponíveis para este fim, destacam-se o Método dos Elementos Finitos, o Método dos Volumes Finitos (MVF) e o Método das Diferenças Finitas. Em teoria, todos estes métodos conduzem ao mesmo resultado desde que a malha utilizada seja suficientemente refinada e os métodos numéricos sejam adequados, embora cada um apresente características que o tornam mais ou menos adequado consoante o tipo de problema em análise (Gonçalves, 2007). Considerando o escoamento em estudo e o *software* de simulação utilizado, optou-se pela aplicação do MVF sendo um dos mais utilizados na análise de escoamentos.

No método MVF, o domínio de cálculo é subdividido num conjunto finito de volumes de controlo (células), aplicando-se as equações de conservação a cada um deles. A variável de interesse encontra-se armazenada no centroide de cada volume de controle, sendo os valores nas suas faces obtidos por interpolação. Através da integração das equações governativas e da aplicação do Teorema de *Gauss*, obtém-se uma equação algébrica por volume de controlo, que relaciona a variável numa célula com as variáveis nas células vizinhas. Uma das vantagens mais relevantes do MVF reside na sua capacidade de ser aplicado a qualquer tipo de malha, tornando-o adequado para geometrias complexas e no facto de todos os termos da equação discretizada possuírem significado físico direto, o que facilita a sua interpretação e implementação (Gonçalves, 2007).

3.5 MALHAS COMPUTACIONAIS

Uma malha computacional representa o domínio físico em estudo, baseando-se em células ou elementos. A resolução da malha é um fator de extrema importância uma vez que quanto maior for, menores serão os erros numéricos obtidos na simulação. No caso de escoamentos turbulentos, devido à existência de um maior número de equações, a imprecisão dos resultados será naturalmente superior o que obriga à utilização de uma malha com um refinamento maior de modo a obter-se resultados mais precisos (Wendt, 2009).

De acordo com Anderson (1995), as malhas podem ser agrupadas em ortogonais, estruturadas e não ortogonais, que podem ser estruturadas ou não, conforme esquematizado na Figura 15.

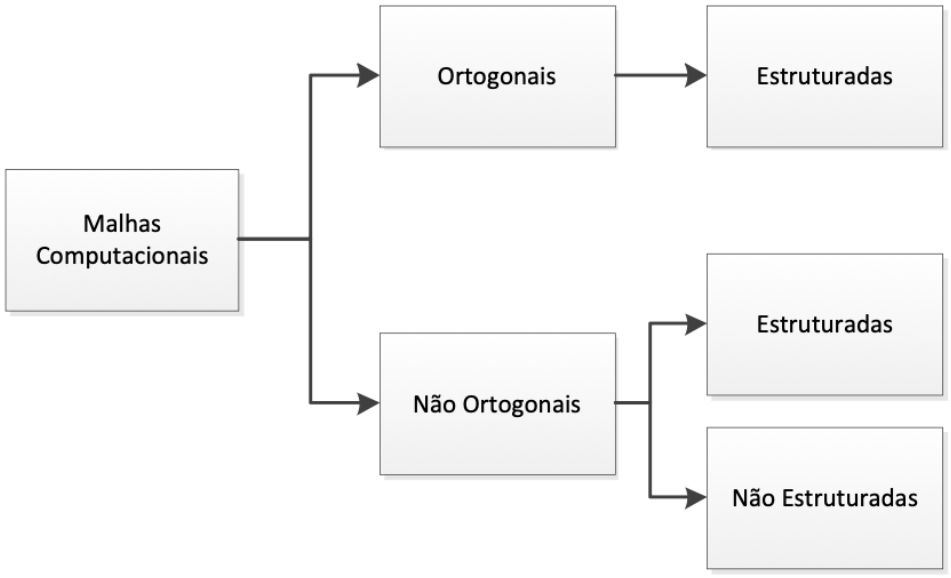


Figura 15 - Tipos de Malhas (adaptado de Anderson, 1995)

As Figuras 16 e 17 representam, respetivamente, exemplos de malhas ortogonais e não ortogonais. Com base na análise das figuras, a diferença entre as duas malhas é notória, sendo a malha não ortogonal a que melhor se adapta à envolvência do pilar, resultando em valores mais precisos nos cálculos das simulações. As duas figuras traduzem malhas estruturadas, caracterizadas por uma organização regular dos elementos, em que cada volume interno possui o mesmo número de volumes vizinhos e uma disposição uniforme ao longo da malha (Bortoli, 2000). As malhas estruturadas apresentam como desvantagem o facto de apenas terem aplicabilidade em

domínios com geometria de complexidade média. Para além disso, a constituição da malha pode ser uma limitação pois a necessidade de refinar uma determinada zona pode conduzir à redução do espaçamento entre células noutra regiões onde esse nível de detalhe não é necessário. Esta situação conduz a um aumento do número total de elementos e, consequentemente, a um maior consumo de recursos computacionais, sendo este efeito particularmente relevante em modelos tridimensionais. (Gonçalves, 2007). A principal vantagem das malhas estruturadas está associada à sua organização regular que facilita a identificação dos volumes e das respetivas células vizinhas. Esta distribuição ordenada permite uma gestão mais eficiente dos dados e, dessa forma, não exige tanto da memória RAM do sistema (Ramos, 2012).

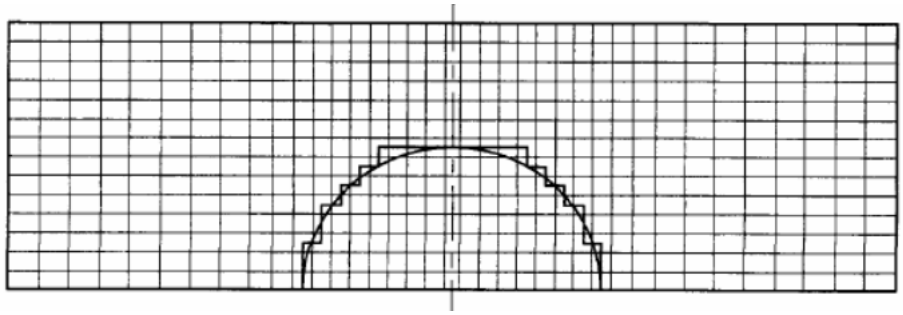


Figura 16 - Exemplo de Malha Ortogonal (Gonçalves, 2007)

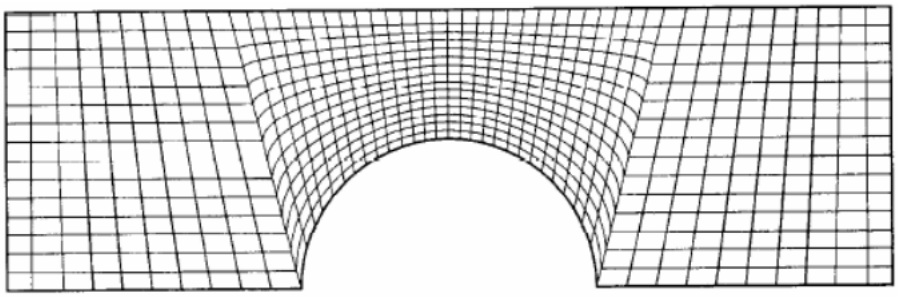


Figura 17 - Exemplo de Malha Não Ortogonal (Gonçalves, 2007)

No caso da geometria do modelo físico em estudo ser de uma complexidade superior, surgem as malhas não estruturadas (Figura 18) cuja principal vantagem é a sua adaptabilidade às diferentes geometrias sem restringir os limites fronteiriços do domínio. Esta tipologia de malha

caracteriza-se por ser oferecer maior flexibilidade, permitindo adaptar a discretização ao domínio de cálculo e concentrar elementos nas zonas onde se requer maior detalhe (Gonçalves, 2007).

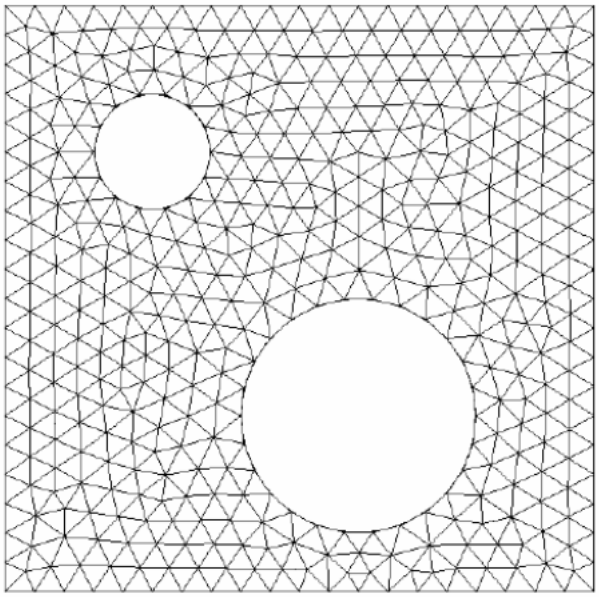


Figura 18 - Exemplo de Malha Não Estruturada (Gonçalves, 2007)

No caso da presente dissertação, a definição da malha assume particular importância devido à presença do pilar e das diferentes configurações de leito consideradas. O escoamento junto ao pilar apresenta variações significativas de velocidade e pressão, tal como zonas de recirculação e formação de vórtices e, por isso, é necessário garantir um refinamento adequado nas proximidades do pilar, junto ao leito e nas regiões onde se preveem maiores gradientes do escoamento.

Deste modo, a malha deve ser suficientemente refinada para melhor representar os principais fenómenos hidrodinâmicos sem comprometer o tempo de cálculo. A construção da malha representa por isso uma etapa fundamental da modelação numérica, exigindo uma análise ponderada entre precisão numérica, representação geométrica e recursos computacionais.

4
CASO DE ESTUDO

O presente capítulo dedica-se à definição e caracterização do caso de estudo que serve de base à modelação numérica desenvolvida, correspondente a diferentes ensaios experimentais realizados no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Este estudo experimental teve como objetivo o estudo e caracterização da cavidade de erosão em torno de pilares simples, para diferentes condições do leito, em particular, em leitos com diferentes camadas. Com base neste enquadramento experimental, e de forma a cumprir os objetivos definidos de caracterização do escoamento, foram consideradas três configurações distintas de leito: leito sem erosão, leito com cavidade de erosão resultante de uma camada de sedimentos e cavidade de erosão com duas camadas sedimentares. Estas configurações permitem representar diferentes condições morfológicas do leito, possibilitando a análise do impacto da geometria da cavidade e da estratificação sedimentar no comportamento do escoamento, nomeadamente ao nível do campo de velocidades, das estruturas de recirculação e das zonas de maior intensidade hidrodinâmica.

Neste capítulo serão descritas as principais características do modelo físico que fundamenta o estudo, com particular ênfase na geometria do canal experimental, nas condições de ensaio e na definição das diferentes configurações de leito. Serão igualmente apresentadas as ferramentas e metodologias utilizadas na caracterização do escoamento, estabelecendo assim a base necessária para a construção e validação do modelo numérico.

4.1 Caracterização do Modelo Experimental

O estudo experimental que serve de base ao presente trabalho foi realizado num canal hidráulico instalado no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Este canal foi concebido para a realização de ensaios em regime de escoamento com superfície livre, permitindo a análise detalhada da interação entre o escoamento e estruturas imersas, nomeadamente no contexto de fenómenos de erosão localizada.

O canal, apresentado na Figura 19, apresenta um comprimento total de aproximadamente 17 m, uma largura de 0.40 m e uma altura de 0.60 m, dimensões que permitem assegurar um desenvolvimento adequado do escoamento antes da interação com o obstáculo.



Figura 19 - Vistas Gerais do Canal (Chaves, 2024)

Na zona central do canal encontra-se instalada uma caixa de sedimentos, com cerca de 1.2 m de comprimento, 0.40 m de largura e 0.20 m de profundidade, na qual se encontra o leito de sedimentos e o pilar. Esta região corresponde à principal área de estudo, sendo possível observar a sua configuração típica na Figura 20**.**



Figura 20 - Caixa de Sedimentos (Chaves, 2024)

A montante da caixa de sedimentos foi instalada uma rampa com 3 m de comprimento e uma inclinação de 1/10, permitindo garantir que o escoamento é permanente e uniforme (Figura 21).



Figura 21 - Rampa de transição (Chaves, 2024)

Por fim, a Figura 22 apresenta um esquema geral da geometria do canal de laboratório utilizado para os ensaios experimentais.

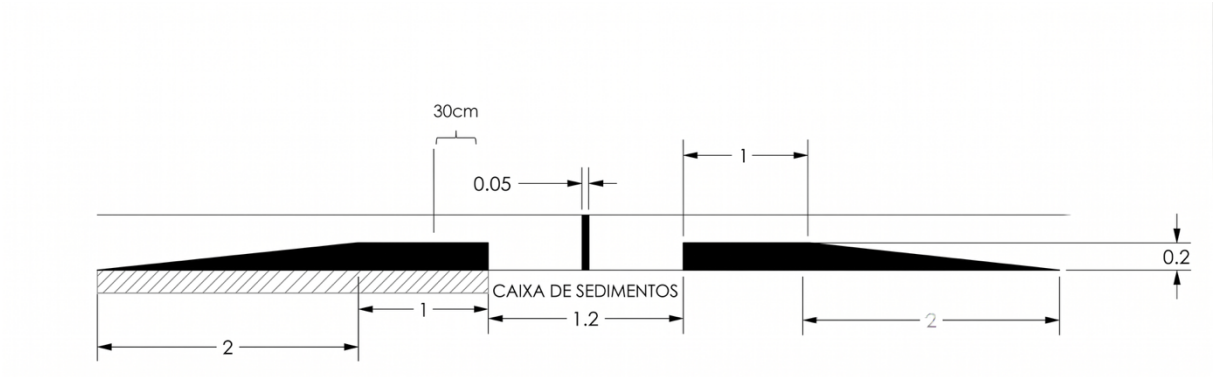


Figura 22 - Esquema do Canal de Laboratório (em metros)

Os ensaios experimentais foram realizados com um pilar simples cilíndrico, com 5 cm de diâmetro (D_p), apresentado na Figura 23. O modelo físico do pilar é composto por 2 partes amovíveis: uma parte com 19 cm de altura, suportada por uma base quadrada de PVC com 1.4 cm de altura que garante a estabilidade da estrutura e outra parte com 61.3 cm.

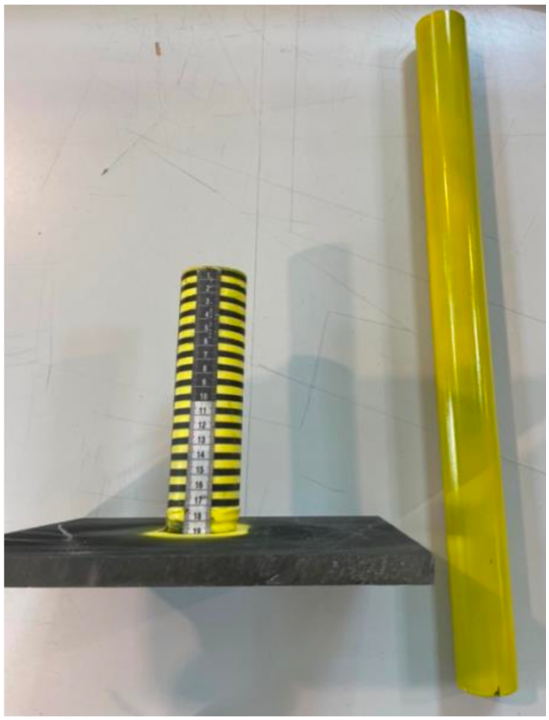


Figura 23 - Peças do Pilar (Ana Chaves, 2024)

Após a sua instalação no centro da caixa de sedimentos, o pilar foi envolvido pelo material sedimentar garantindo uma melhor fixação da estrutura e, consequentemente, uma maior estabilidade.

4.2 Condições de Escoamento

O escoamento considerado no estudo experimental, em superfície livre, permanente e uniforme, é definido por um caudal de 10.8 L/s, controlado através de um caudalímetro instalado a montante do canal e uma altura do escoamento de 15 cm, controlada por uma comporta localizada a jusante (Chaves, 2024). Para confirmar a condição do escoamento e verificar a velocidade, foi medido um perfil vertical de velocidades (Figura 24), com recurso a um equipamento de Velocimetria Acústica Doppler (*Accoustic Doppler Velocimetry* - ADV).

A medição do perfil vertical de velocidades foi realizada 30 cm a montante da caixa de sedimentos sem a instalação no pilar na mesma. O primeiro ponto do perfil de velocidades foi medido 0.5 cm acima do fundo, com incrementos de 1 cm até à superfície livre.

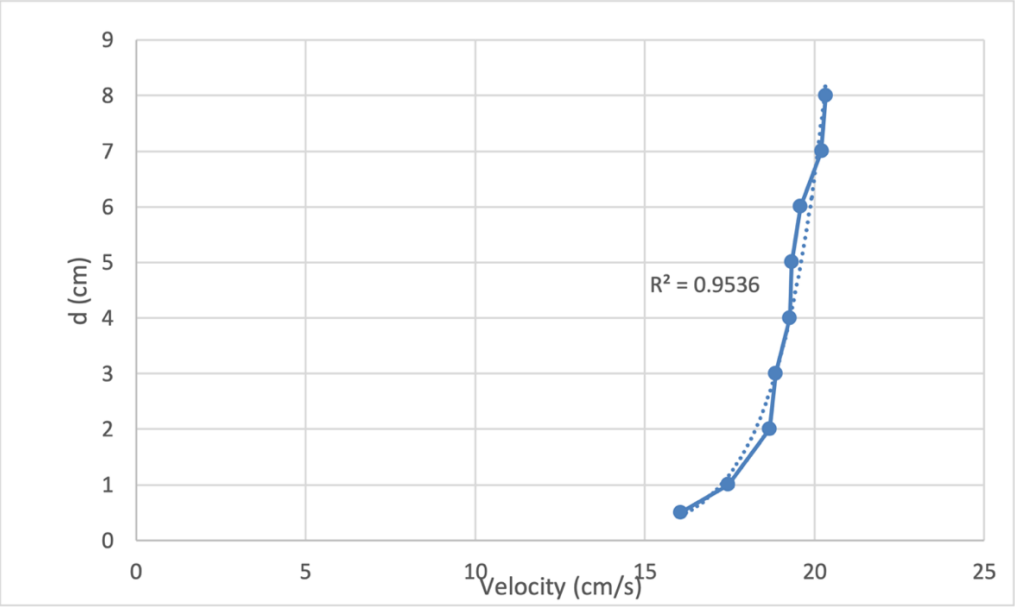


Figura 24 - Perfil de Velocidades (Ana Chaves, 2024)

Embora o perfil de velocidades apresentado na Figura 24 apresente a distribuição da velocidade em função da profundidade, este não constitui uma descrição completa do perfil de velocidades ao longo de toda a altura do escoamento. Uma vez que a modelação numérica do escoamento requer a definição de uma condição de fronteira de entrada detalhada, procedeu-se à reconstrução do perfil de velocidades a partir dos dados do perfil apresentado obtido experimentalmente. Para tal, com base nos pontos medidos, foi efetuado um ajuste matemático através de uma re-

gressão, permitindo obter uma expressão para a velocidade em função da profundidade. Com base na expressão obtida, foram extrapolados os valores da velocidade ao longo dos 15 cm de coluna de água, constituindo assim um perfil vertical de velocidades completo (Figura 25).

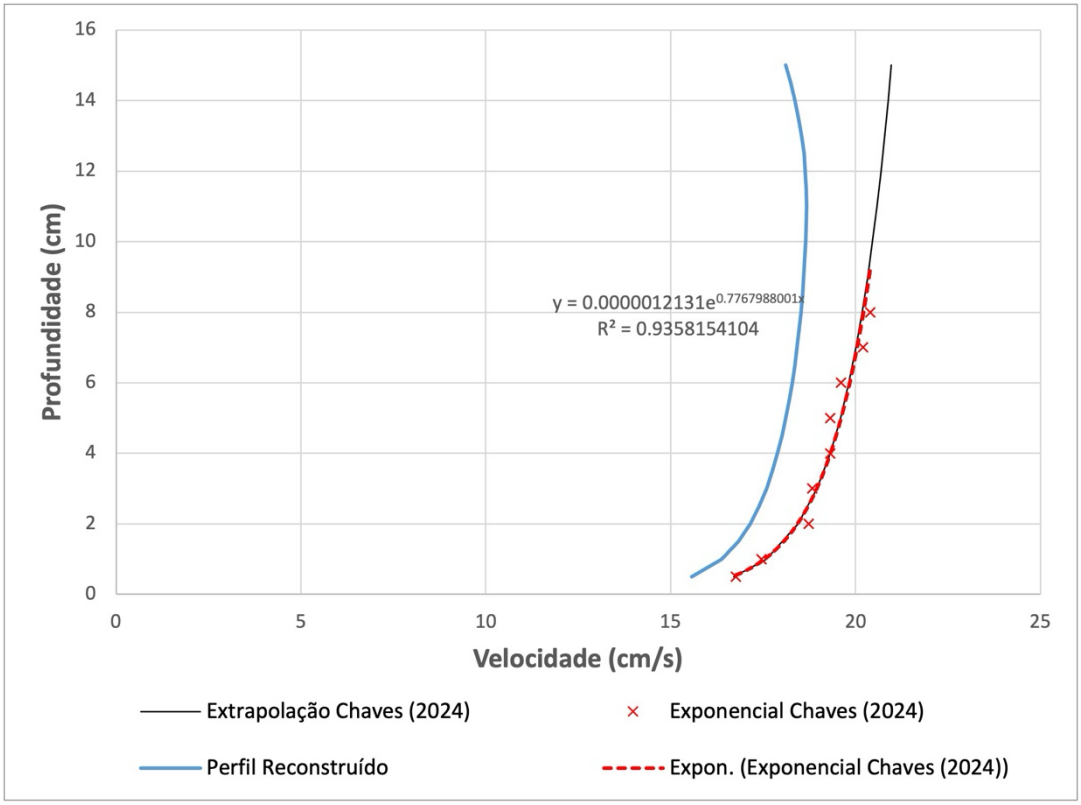


Figura 25 - Perfil de Velocidades Reconstruído

Numa primeira fase, o perfil obtido por extrapolação foi integrado ao longo da profundidade e da largura do canal, de modo a determinar o caudal por ele representado, tendo-se obtido um valor superior ao caudal experimental de 10.8 L/s. Por esse motivo, os parâmetros da regressão foram ajustados iterativamente, mantendo a forma geral do perfil, até que a integração da distribuição de velocidades conduzisse ao caudal pretendido. O perfil resultante, apresentado na Figura 25, foi adotado como perfil de referência, servindo posteriormente para a definição da condição de entrada e para a comparação com os perfis obtidos nas simulações tridimensionais.

Com base no caudal definido em 10.8 L/s, na altura de escoamento de 0.15 m e na largura do canal com 0.40 m, procedeu-se à caracterização do escoamento através da determinação dos principais parâmetros hidráulicos. Foi considerada uma velocidade média de escoamento de 0.18 m/s, um número de *Reynolds* de 8911, calculado através da Equação 1, considerando o

diâmetro do pilar de 5 cm, classificando assim o escoamento como sendo turbulento, característico de escoamentos em torno de pilares de pontes. Para a caracterização dos fenómenos de desprendimento dos vórtices na esteira do pilar, foi adotado um valor do número de *Strouhal* de 0.2, de acordo com *Roshko* (1954) e *Williamson* (1996), e, desse modo, estimou-se um valor da frequência de 0.72 Hz, com base na Equação 2.

Com base nos principais parâmetros hidráulicos definidos, estabelece-se um bom enquadramento para a interpretação dos resultados das simulações numéricas apresentadas no Capítulo 6.

Por fim, a Tabela 2 apresenta os principais parâmetros hidráulicos associados ao escoamento do caso em estudo.

Tabela 2 - Parâmetros Hidráulicos do Escoamento

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Caudal	Q	L/s	10.8
Altura de Escoamento	h	m	0.15
Velocidade Média	U	m/s	0.18
Largura do Canal	b	m	0.4
Número de *Reynolds*	Re	-	8911
Número de *Strouhal*	St	-	0.2
Frequência de Desprendimento dos Vórtices	f	Hz	0.72

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO LEITO

As camadas do leito consideradas nos ensaios experimentais não são homogéneas, sendo constituídas por materiais com diferentes propriedades granulométricas, organizadas em distintas configurações. Deste modo, é possível representar de forma mais realista as condições naturais

frequentemente observadas em rios e estuários, onde o leito apresenta estratificação sedimentar. O presente caso de estudo irá abranger três configurações distintas, correspondentes a diferentes geometrias de cavidade de erosão obtidas experimentalmente, permitindo assim analisar de forma comparativa o comportamento do escoamento em torno do pilar.

No âmbito da presente dissertação, foram selecionadas duas configurações descritas em Zefzouf et al., (2025), por constituírem um conjunto representativo para a análise da erosão localizada em torno de pilares simples sob condições de escoamento permanente e em regime de *clear-water*. Estas configurações abrangem duas situações fundamentais: um caso de referência, com leito homogéneo e uma configuração em que o leito apresenta variação vertical das propriedades sedimentares.

As configurações escolhidas correspondem a cavidades desenvolvidas experimentalmente em leitos com diferentes características granulométricas e diferentes camadas sedimentares, originando diferentes geometrias de cavidade. Na presente dissertação, essas cavidades são consideradas como superfícies fixas, não tendo sido modelado o processo erosivo nem o transporte de sedimentos. Consequentemente, parâmetros como a granulometria, a espessura das camadas ou as propriedades dos materiais não influenciam diretamente as simulações numéricas do escoamento. A análise incidiu exclusivamente no comportamento hidrodinâmico do escoamento no interior das cavidades previamente formadas, permitindo analisar de que forma a geometria resultante da erosão condiciona a distribuição de velocidades, formação das estruturas turbulentas e os restantes fenómenos ocorrentes no escoamento.

4.3.1 Caracterização dos Sedimentos

No âmbito dos ensaios experimentais considerados para este estudo, foram utilizados dois tipos de material sedimentar distintos, designados por FS1 (Areia Fina) e CS1 (Areia Grossa), apresentadas na Figura 26, os quais se diferenciam essencialmente pelas suas propriedades granulométricas. Com a utilização destes dois materiais pretende-se analisar a influência da dimensão dos grãos na interação entre o escoamento e o leito, bem como o desenvolvimento da erosão localizada em torno do pilar.



Figura 26 - Areias Utilizadas para os Ensaios de Referência

A utilização de sedimentos com características distintas revela-se particularmente relevante uma vez que a granulometria condiciona diretamente a resistência ao início da mobilização dos sedimentos, a resistência à erosão e, consequentemente, a evolução das cavidades de erosão. Neste contexto, o material FS1 corresponde a uma areia de granulometria mais fina, enquanto o material CS1 apresenta uma granulometria mais grosseira, traduzindo-se em comportamentos distintos quando sujeitos à ação do escoamento.

A areia fina, FS1, corresponde a uma areia de sílica SP 55 com uma densidade de ρ_s = 2650 kg/m^3, um diâmetro médio igual a D_{50} = 0.273 mm (Silva, 2010), um coeficiente de uniformidade σ_D = 1.8 e a análise granulométrica apresentada na Tabela 3. A Areia Grossa, CS1, tem um D_{50} = 0.48 mm, um coeficiente de uniformidade σ_D = 2.03 e a análise granulométrica é apresentada na Tabela 4 (Chaves, 2024). Na Figura 27 encontram-se representadas as curvas granulométricas das duas areias.

Tabela 3 - Análise da Granulometria da Areia Fina

Abertura do Peneiro (mm)	Retidos (%)	Retidos Acumulados (%)	Passados Acumulados (%)
1.000	0.00	0.00	100.00
0.710	0.00	0.00	100.00
0.500	0.00	0.00	100.00
0.355	4.67	4.67	95.33
0.250	58.20	62.87	37.13
0.180	29.66	92.53	7.47
0.125	7.12	99.65	0.35
0.090	0.34	99.99	0.01
0.063	0.01	100.00	0.00
<0.063	0.00	100.00	0.00

Tabela 4 - Análise Granulométrica da Areia Grossa

Abertura do Peneiro (mm)	Retidos (%)	Retidos Acumulados (%)	Passados Acumulados (%)
90.000	0.0	0.0	100.0
63.000	0.0	0.0	100.0
31.500	0.0	0.0	100.0
16.000	0.0	0.0	100.0
8.000	0.0	0.0	100.0
4.000	0.1	0.1	99.9
2.000	2.8	2.8	97.2
1.000	9.4	12.2	87.8
0.500	34.5	46.7	53.3
0.250	53.2	99.8	0.2
0.125	0.0	99.8	0.2
0.063	0.0	99.8	0.2
<0.063	0.0	99.8	0.2

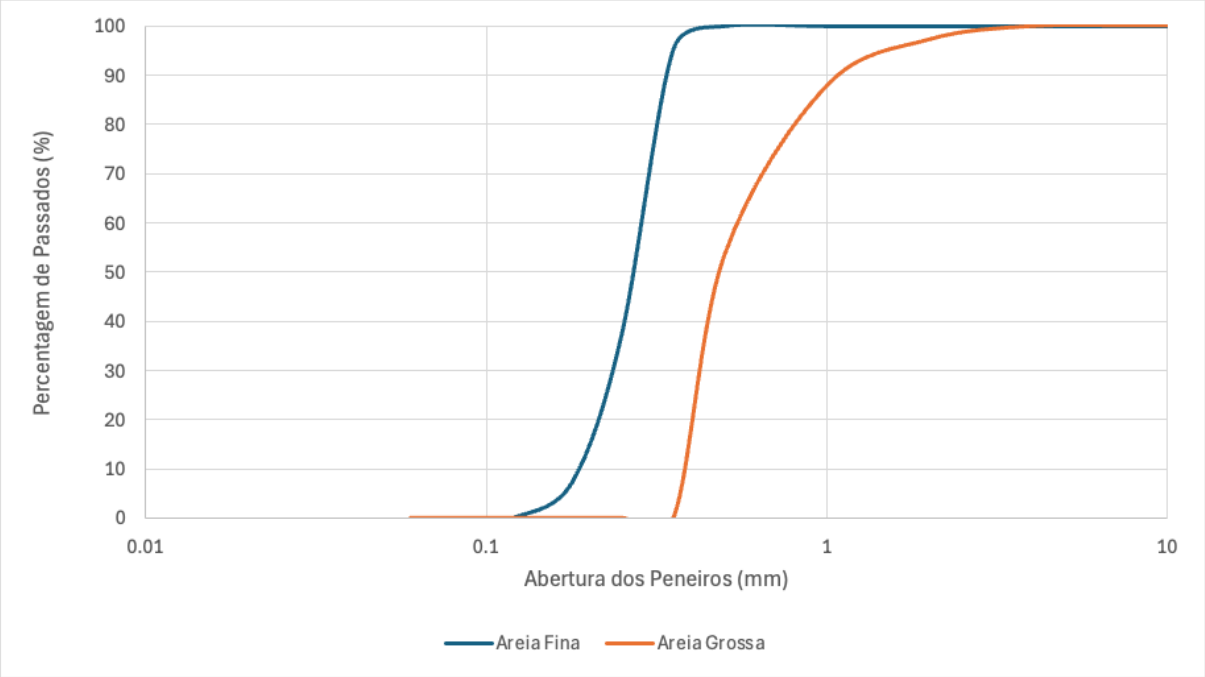


Figura 27 - Curvas Granulométricas das Areias de Referência

4.3.2 Caracterização das Camadas dos *Ensaios*

De forma a uniformizar a nomenclatura utilizada ao longo da presente dissertação, as diferentes configurações do leito serão designadas por C0, C1 e C2. A configuração C0 corresponde ao leito plano, sem erosão localizada, constituindo um caso de referência que não possui correspondência direta nos ensaios experimentais de Zefzouf et al. (2025). A configuração C1 corresponde à cavidade de erosão desenvolvida no Ensaio ID1, realizada sobre um leito homogéneo de areia fina (FS1), enquanto a configuração C2 corresponde à cavidade obtida no Ensaio ID5, desenvolvida num leito estratificado constituído por uma camada superior de areia grossa (CS1) sobre uma camada inferior de areia fina (FS1). Esta nomenclatura será adotada nos capítulos seguintes, facilitando a identificação e comparação das diferentes configurações consideradas na modelação numérica.

A configuração C1 corresponde a uma configuração homogénea, constituída por uma camada de areia fina FS1 com 20 cm de espessura. Durante o ensaio experimental, a maior facilidade de mobilização deste material permitiu o desenvolvimento de uma cavidade de erosão localizada com geometria própria, posteriormente utilizada como referência no presente estudo. Na

modelação numérica, esta cavidade é considerada fixa, não sendo reproduzida a evolução do fundo nem o transporte de sedimentos.

A configuração C2 corresponde a uma configuração estratificada, constituída por uma camada superior de areia grossa CS1, com 3 cm de espessura, sobre uma camada inferior de areia fina FS1, com 17 cm. Durante o processo experimental de erosão localizada, a maior resistência à mobilização da camada superficial condicionou a evolução da cavidade e a eventual exposição do material mais fino subjacente, originando uma geometria distinta da obtida no leito homogéneo.

Estas duas configurações permitem comparar o escoamento em cavidades com geometrias distintas, formadas sob condições sedimentares diferentes. Embora a granulometria e a disposição das camadas tenham condicionado a morfologia final observada experimentalmente, esses parâmetros não são considerados diretamente na modelação numérica.

A análise centra-se, assim, na resposta hidrodinâmica associada a cada geometria de cavidade, com particular atenção à distribuição de velocidades, às regiões de recirculação e às zonas de maior intensidade do escoamento em torno do pilar.

4.4 Profundidade e Extensão da Cavidade de Erosão

A caracterização da cavidade de erosão foi realizada com base nos resultados experimentais apresentados por Zefzouf et. al. (2025), nos quais a profundidade máxima da cavidade de erosão, S_c, corresponde à situação de equilíbrio, ou seja, ao valor obtido no final do ensaio. As duas condições que servem de base ao estudo numérico correspondem a duas configurações: a configuração C1, que apresenta uma profundidade de equilíbrio de 6.0 cm, correspondendo a um valor adimensional $S_c/D = 1.2$ e a configuração C2, ao qual corresponde uma profundidade inferior de 4.5 cm, com $S_c/D = 0.9$ cm, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Profundidade de Erosão das Configurações C1 e C2 (Zefzouf et al., 2025)

Configuração	S_c (cm)	S/D (-)
C1	6.0	1.2
C2	4.5	0.9

Para além da profundidade, a geometria da cavidade pode ser analisada através da sua extensão máxima (*E*). Os resultados apresentados na Tabela 6 indicam que a configuração C1 apresenta uma extensão máxima de 10.7 cm, correspondente a um valor de *E/D* = 2.14, enquanto a C2 apresenta uma extensão de 9.5 cm, com *E/D* = 1.90.

Tabela 6 - Extensão Máxima da Cavidade de Erosão das Configurações C1 e C2 (Zefzouf et al., 2025)

Configuração	E (cm)	E/D (-)
C1	10.7	2.14
C2	9.5	1.90

Em termos globais, a análise conjunta dos resultados mostra que a presença de uma camada superficial de material mais grosseiro desempenha um papel determinante na limitação da erosão localizada, reduzindo tanto a profundidade como, em menor grau, a extensão da cavidade.

Para além da caracterização geométrica e hidráulica anteriormente descrita, apresenta-se de seguida as nuvens de pontos (Figuras 28 e 29) correspondentes às cavidades de erosão obtidas experimentalmente. Estas representam com elevado detalhe a geometria tridimensional das cavidades desenvolvidas durante os ensaios experimentais, tendo sido obtidas através de um levantamento por varrimento a laser (*laser scanning*). Na presente dissertação, estas constituíram a base para a reconstrução das superfícies de erosão utilizadas na modelação numérica.

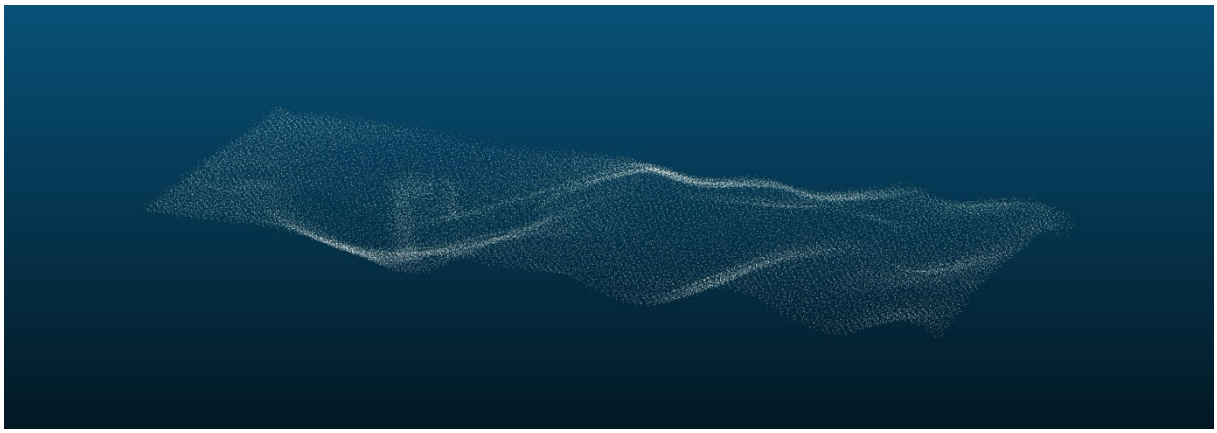


Figura 28 - Nuvem de Pontos da Configuração C1

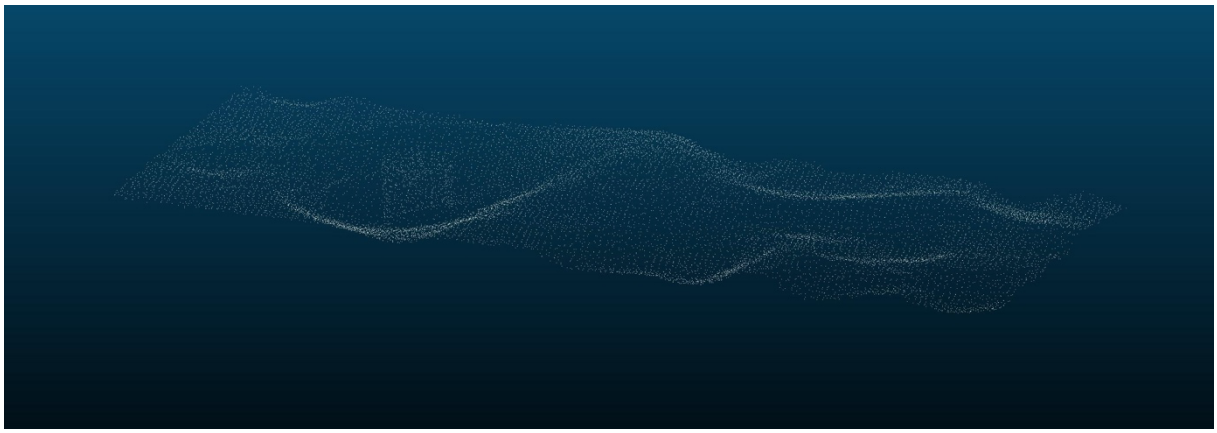


Figura 29 - Nuvem de Pontos da Configuração C2

A caracterização do modelo experimental apresentada neste capítulo constitui a base para o desenvolvimento do modelo numérico, assegurando que a geometria, as condições de escoamento e as cavidades de erosão consideradas nas simulações reproduzem, de forma representativa, as condições dos ensaios laboratoriais. O Capítulo 5 descreve a metodologia adotada para a construção do modelo tridimensional e a implementação das simulações numéricas em *OpenFOAM*.

5
METODOLOGIA

A metodologia abordada neste capítulo tem como principal objetivo descrever o processo que foi desenvolvido de modo a reproduzir, em ambiente numérico, o escoamento do modelo experimental. O procedimento adotado procurou estabelecer uma ligação coerente entre o modelo físico e as simulações realizadas, garantindo que a geometria, as condições de escoamento e os dados experimentais disponíveis fossem incorporados de forma adequada no modelo numérico. Ao longo deste processo, foi igualmente necessário efetuar algumas adaptações e recorrer à estimativa de determinados parâmetros cuja informação não se encontrava disponível, procurando sempre preservar a coerência física do modelo numérico.

O desenvolvimento das simulações 2D e 3D envolveu um conjunto sequencial de etapas, desde a preparação da geometria até à análise dos resultados obtidos, cujos passos foram os seguintes:

1. Construção da geometria do modelo;
2. Preparação da geometria para incorporação no *OpenFOAM*;
3. Geração da malha computacional;
4. Definição dos modelos físicos e numéricos;
5. Definição das condições iniciais e de fronteira;
6. Execução das simulações numéricas;
7. Pós-processamento dos resultados;
8. Análise dos resultados e comparação com os valores teóricos e experimentais.

As simulações numéricas desenvolvidas neste trabalho foram realizadas num computador portátil equipado com um processador Apple Silicon M4 e 16 GB de memória RAM. No entanto, devido ao elevado custo computacional associado às simulações tridimensionais de maior re-

solução, estas foram executadas no computador de alto desempenho (*High Performance Computing* - HPC) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com o apoio de um investigador do LNEC.

A implementação dos casos numéricos foi efetuada recorrendo ao programa de código aberto e utilização gratuita *OpenFOAM* na versão v2412. Devido ao facto de o *OpenFOAM* ter sido originalmente desenvolvido para operar em sistemas operativos *Linux*, a sua utilização foi feita através da plataforma Docker no macOS, o sistema operativo nativo do Mac. A plataforma Docker permite a execução de aplicações em contentores virtuais, disponibilizando um ambiente isolado em Linux, sem a necessidade de instalação adicional de um sistema operativo *Linux* no computador utilizado.

Ao contrário de outros softwares comerciais de modelação numérica de fluidos, o *OpenFOAM* não possui interface gráfica integrada para a configuração e execução das simulações. A definição dos casos numéricos é realizada através de ficheiros de texto que contenham informações acerca da geometria, condições de fronteira, modelos físicos utilizados e parâmetros numéricos.

Para a execução das diferentes etapas do processo numérico, como geração da malha, criação do domínio e resolução numérica do escoamento, foi utilizado o Terminal nativo do macOS para correr os comandos necessários à sua execução, que comunica diretamente com o ambiente *OpenFOAM* disponibilizado pelo Docker.

A implementação numérica foi desenvolvida de forma faseada, iniciando-se com simulações bidimensionais simplificadas e avançando posteriormente para modelos tridimensionais mais próximos da configuração experimental. Esta estratégia permitiu, numa primeira fase, testar o funcionamento do modelo numérico, analisar a influência da discretização espacial bem como avaliar a capacidade do *OpenFOAM* em reproduzir os fenómenos fundamentais associados ao escoamento em torno de um pilar, nomeadamente a formação da esteira, a libertação periódica de vórtices e a evolução dos coeficientes de arrastamento e sustentação.

As simulações bidimensionais constituíram uma etapa preliminar, mas fundamental, no desenvolvimento da metodologia numérica. Apesar de não representarem integralmente a complexidade tridimensional do modelo experimental, permitiram analisar a sensibilidade dos resultados

à discretização espacial, comparar diferentes estratégias de geração da malha e selecionar uma configuração numérica mais robusta para servir de base às simulações subsequentes.

Posteriormente, com base na experiência adquirida nas simulações bidimensionais, procedeu-se ao desenvolvimento do modelo tridimensional representativo do caso experimental em estudo. Nesta fase foram definidas as características geométricas e físicas do modelo experimental, incorporando-se na geometria computacional as diferentes configurações da cavidade de erosão localizada consideradas no estudo. Deste modo, tornou-se possível representar de forma mais realista os fenómenos hidrodinâmicos em análise e estabelecer uma comparação mais rigorosa com os resultados experimentais disponíveis.

5.1 CONFIGURAÇÃO DE UM CASO OPENFOAM

Conforme referido, as configurações e simulações realizadas em *OpenFOAM* não utilizam uma interface gráfica, recorrendo a ficheiros de texto para execução e controlo dos comandos necessários. A configuração de um caso *OpenFOAM* encontra-se estruturada em vários diretórios que contêm ficheiros de texto, através dos quais são definidos os diferentes parâmetros e condições: geometria do modelo, método de geração de malha, propriedades dos fluidos, condições de fronteira, entre outros.

A estrutura de um caso de simulação em *OpenFOAM* encontra-se organizada em três diretórios principais: *0/*, *constant/* e *system/.* A pasta *0/* armazena as condições iniciais das variáveis que serão resolvidas pelo modelo, incluindo a velocidade, pressão, fração de fase e turbulência.

A pasta *constant/* reúne os ficheiros associados às propriedades físicas e geométricas do problema, incluindo o ficheiro *transportProperties*, no qual são definidas as propriedades dos fluidos considerados, neste caso o ar e a água, o ficheiro *g*, com a definição da aceleração gravítica e o ficheiro *turbulenceProperties,* que indica qual o modelo de turbulência utilizado para a simulação. Na presente dissertação, a pasta *constant/* contém ainda a pasta *polyMesh/* que armazena os ficheiros que definem a malha computacional, que são gerados de forma automática por comandos base do *OpenFOAM* como *blockMesh* e *snappyHexMesh*, consoante o tipo de malha.

Por sua vez, a pasta *system/* inclui os ficheiros responsáveis pelos parâmetros de controlo da simulação, pela definição dos métodos numéricos e pela execução de operações adicionais. O ficheiro *controlDict* define os principais parâmetros de controlo do tempo da simulação, tais como: tempo inicial e final da solução, o passo de tempo e a frequência de escrita dos resultados. Os ficheiros *fvSchemes* e *fvSolution* definem os esquemas numéricos utilizados na discretização e de que forma são configurados os métodos numéricos para resolver as equações. Recorreu-se também à utilização de um ficheiro *setFieldsDict* para a definição da distribuição da água e do ar no instante inicial, um fator relevante quando se trata de simulações que contenham superfície livre. Nesta dissertação, utilizou-se também o ficheiro *forceCoeffs* que permitiu monitorizar e registar as forças exercidas no pilar bem como o cálculo e registo de coeficientes de arrastamento e sustentação.

De modo a simplificar a execução das diferentes etapas das simulações, foram utilizados três *scripts* distintos, responsáveis pela execução dos comandos mais frequentes durante o desenvolvimento das simulações. O *Allclean* tem como função limpar o caso da simulação, eliminar resultados e ficheiros que tenham sido gerados em simulações anteriores, garantindo que se inicia uma nova simulação sem dados de simulações antigas. O script *Allmesh* é responsável pela geração da malha computacional, onde também se define o nível de refinamento pretendido. Por fim, o script *Allrun* executa os comandos necessários para correr a simulação, começando por ativar o *Allmesh*, define as condições iniciais através do *setFields*, de seguida decompõe o domínio de forma a serem processados em paralelo através do comando *decomposePar* e por último inicia a resolução do escoamento com recurso ao *solver* estipulado no ficheiro *controlDict*. A utilização destes scripts oferece uma maior segurança na execução das simulações, minimizando a probabilidade da ocorrência de erros que possam surgir durante o processo.

A Tabela 7 apresenta os parâmetros mais relevantes para a configuração de um caso tridimensional utilizado nas simulações 3D relativamente ao controlo temporal das simulações.

Tabela 7 - Parâmetros de Controlo Temporal da Simulação (*controlDict*)

Parâmetro	Valor Utilizado	Descrição
solver	interFoam	modelo bifásico incompressível
startFrom	latestTime	Método de arranque da simulação
startTime	0	Tempo inicial
endTime	200	Tempo final
deltaT	0.0001	Passo de tempo inicial
writeInterval	5	Intervalo de gravação/escrita dos resultados
maxCo / maxAlphaCo	0.9	número de Courant

5.2 SIMULAÇÕES 2D

Numa fase inicial do trabalho, foram testadas várias configurações bidimensionais com o objetivo de avaliar a capacidade do modelo numérico para a introdução ao OpenFOAM e para reproduzir os principais fenómenos hidrodinâmicos associados ao escoamento em torno de um pilar. Para tal, analisaram-se a estratégia de geração e refinamento da malha, algumas condições de fronteira e os parâmetros associados à modelação da turbulência. A comparação dos resultados obtidos permitiu selecionar a configuração que apresentou o comportamento mais adequado para prosseguir o estudo 2D, designada por Malha C. Por esse motivo, o presente subcapítulo incide apenas sobre esta configuração.

A Malha C foi, assim, adotada como configuração final das simulações bidimensionais e como caso de referência para a análise dos resultados. A sua seleção resultou da avaliação conjunta da representação do escoamento em torno do pilar, do desenvolvimento da esteira e da estabilidade da solução numérica. Para além disso, a aplicação utilizada na sua geração (*snappyHexMesh*), baseia-se na construção de uma malha de fundo e na introdução posterior do pilar e das regiões de refinamento, foi mantida como base metodológica para a geração das malhas tridi-

mensionais, com as adaptações necessárias à representação da geometria e dos fenómenos próprios de um domínio 3D.

Para a resolução numérica do escoamento das simulações 2D foi utilizado o modelo *pimpleFoam*, adequado para escoamentos monofásicos, incompressíveis e turbulentos. A escolha deste modelo justifica-se pela necessidade de capturar a evolução temporal do escoamento, nomeadamente os fenómenos de separação da camada limite e o desprendimento de vórtices na esteira. Optou-se também pela utilização do modelo *URANS* (*Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) pois este possibilita a análise da evolução temporal dos fenómenos turbulentos como é o caso do desprendimento dos vórtices. A turbulência foi modelada através do modelo de turbulência *k-ω SST* devido à sua capacidade para representar escoamentos sujeitos a gradientes de pressão adversos e fenómenos de separação, características frequentemente observadas em escoamentos em torno de pilares.

A geração da malha computacional utilizada para as simulações bidimensionais tem início na criação de uma malha estruturada correspondente ao domínio de cálculo através do ficheiro *blockMesh*, onde é definido o volume global do canal, discretizado por células hexaédricas, sem incluir ainda a geometria do pilar.

De seguida, o ficheiro *snappyHexMesh* foi utilizado para introduzir a geometria do pilar no domínio e adaptar a malha à sua geometria. Para além da representação da superfície curva do cilindro, foram também definidas zonas de refinamento na proximidade do pilar e na região de esteira a jusante, uma vez que correspondem às áreas onde se verificam as principais alterações e fenómenos do escoamento, nomeadamente a separação do escoamento e a formação de vórtices.

Após o processo de refinamento da malha, o ficheiro *extrudeMesh* reconstruiu a malha final com apenas uma célula no plano perpendicular ao da simulação. Por fim, através do *createPatch,* definiram-se as superfícies frontal e traseira do domínio como sendo do tipo *empty*, condição que impõe a inexistência de variações das variáveis de escoamento nessa direção permitindo a resolução do problema como se tratando de um caso bidimensional.

É importante salientar também que foram geradas cinco malhas com diferentes níveis de refinamento, cujo objetivo passa por analisar a influência da discretização espacial nos resultados

numéricos obtidos. A variação entre as diferentes configurações foi efetuada através da resolução da malha de fundo gerada pelo *blockMesh*, não sofrendo alterações ao nível da geometria do domínio e das regiões refinadas definidas no *snappyHexMesh*. O refinamento das malhas foi feito progressivamente através da redução do tamanho característico das células da malha de fundo, conduzindo a um aumento do número de células em ambas as direções do domínio (Tabela 8). De forma a comparar a malha mais grosseira e a malha mais refinada, a Figura 30 apresenta a malha gerada com o nível de resolução mais baixo, nível 1 (*MeshRes1*) e a Figura 31 a malha correspondente ao nível de resolução mais elevado, o nível 5 (*MeshRes5*).

Tabela 8 - Número de Células por Nível de Refinamento (Simulações 2D)

Nível de Resolução da Malha	Número de Células
1	5925
2	9721
3	15074
4	25132
5	41294

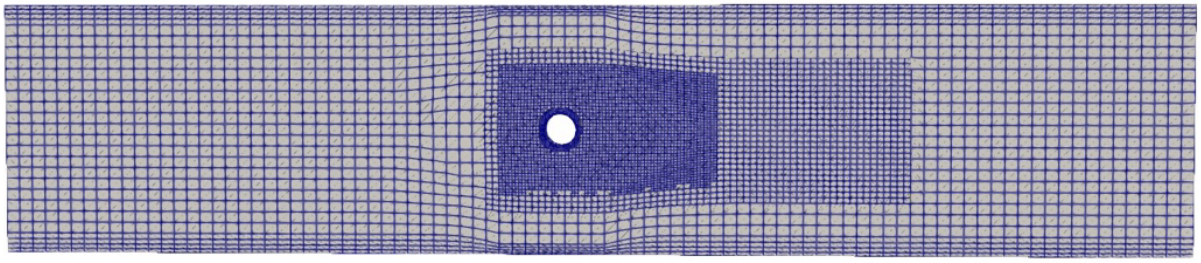


Figura 30 - Vista Geral da Malha *MeshRes1*

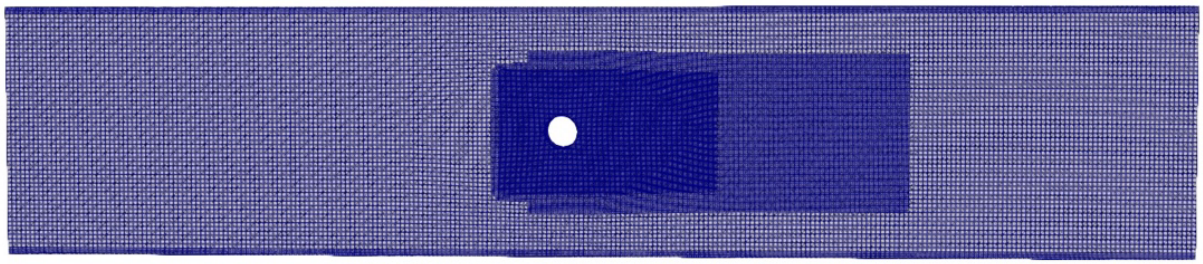


Figura 31 - Vista Geral da Malha *MeshRes5*

A comparação entre as Figuras 31 e 32 evidencia, para a malha *MeshRes5*, um aumento significativo da densidade de células em todo o domínio, particularmente nas regiões envolventes ao pilar e na esteira a jusante, onde se espera a ocorrência de maiores gradientes de velocidade. Este refinamento permite uma representação mais detalhada do escoamento, embora implique um aumento do número de células e, consequentemente, do custo computacional.

5.3 SIMULAÇÕES 3D

Uma vez validada a metodologia 2D, procedeu-se ao desenvolvimento do modelo tridimensional. Ao contrário do modelo bidimensional, as simulações 3D permitem uma melhor representação de todos os fenómenos característicos do escoamento em torno de um pilar. Os vórtices em ferradura, a influência da cavidade de erosão na formação das estruturas turbulentas, os gradientes de pressão, as variações de velocidade e muitos outros, são fenómenos que apenas numa simulação 3D se consegue caracterizar corretamente.

5.3.1 Preparação da Geometria

A primeira fase do desenvolvimento do modelo tridimensional corresponde à preparação da geometria do modelo. Para isso, recorreu-se aos dados obtidos através do levantamento tridimensional realizado sobre o modelo experimental por varrimento laser, disponibilizados num ficheiro .bin, permitindo, através do software *CloudCompare*, visualizar as nuvens de pontos das diferentes configurações consideradas durante o trabalho experimental (Figura 28 e Figura 29).

Após a seleção das duas configurações para o presente estudo, converteu-se cada uma das nuvens de pontos para um formato *STL* (*Standard Triangle Language*), que corresponde ao formato padrão utilizado para modelação *CAD*, de modo a poder posteriormente incorporar as cavidades num modelo compatível com o *OpenFOAM*.

A Figura 32 apresenta a vista superior e longitudinal das duas configurações de fundo sendo as imagens a) e b) correspondentes à configuração C1, com apenas uma camada da areia FS1, e as imagens c) e d) à configuração C2, onde a areia CS1 se encontra na camada superior e a areia FS1 na camada inferior.

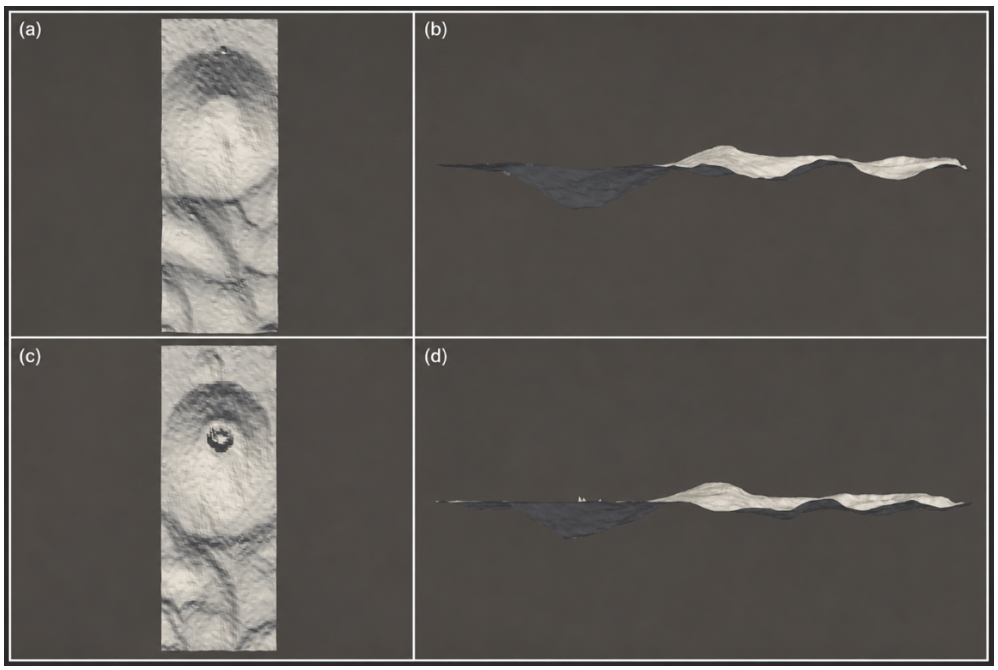


Figura 32 – Configurações C1 e C2 em formato *STL* obtidas através dos Dados Experimentais

A análise da Figura 33 evidencia duas limitações associadas aos dados obtidos por varrimento laser: em primeiro, as nuvens de pontos disponíveis abrangiam apenas uma parte da área total da caixa de sedimentos, não permitindo conhecer diretamente a continuidade da geometria do leito para além da região digitalizada. Em segundo lugar, a superfície registada apresentava diversas irregularidades e sobreelevações, sobretudo a jusante da cavidade de erosão e junto às margens laterais.

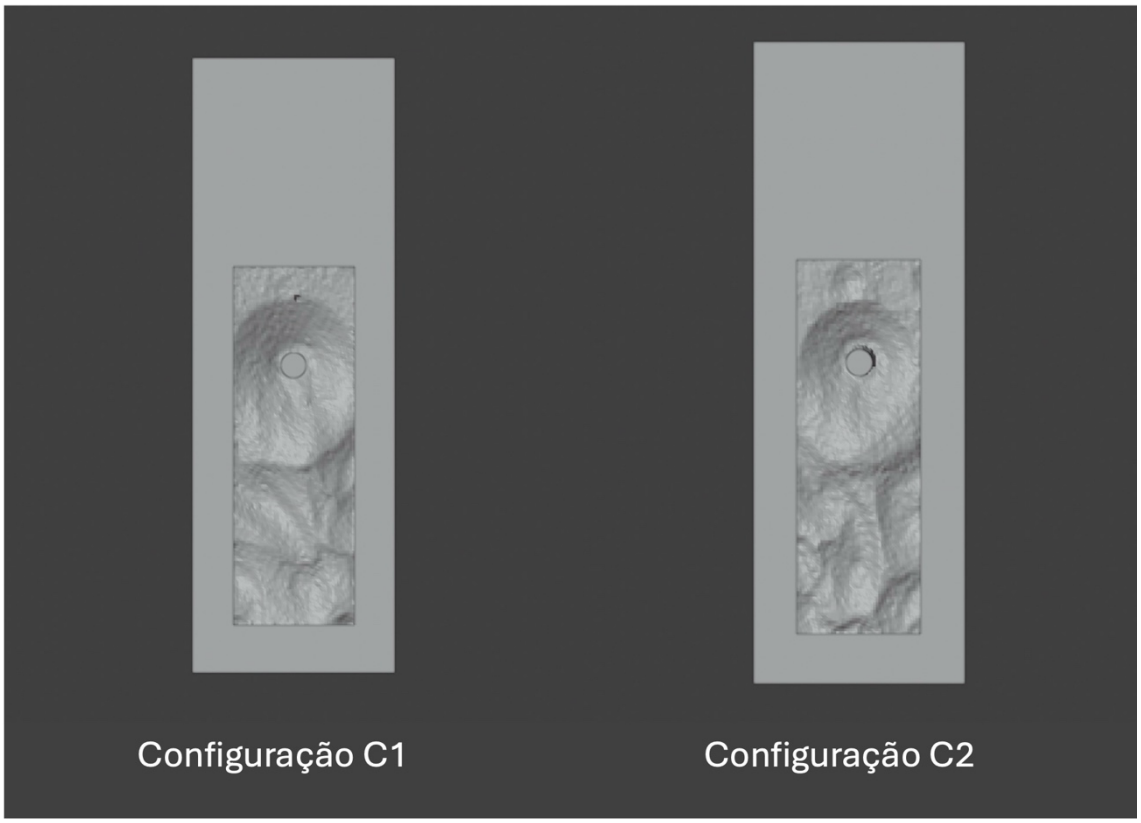


Figura 33 - Área da Caixa de Sedimentos Digitalizada nas Configurações C1 e C2.

A conjugação destas duas limitações dificultava a utilização direta da superfície digitalizada na construção do domínio numérico, uma vez que não era possível assegurar uma transição contínua e geometricamente coerente para as restantes zonas do leito. Tornou-se, assim, necessário proceder ao tratamento e à simplificação da geometria antes da sua incorporação no modelo computacional.

Deste modo, equacionaram-se duas possibilidades para poder incorporar toda a região digitalizada no modelo: proceder à extrapolação da geometria da cavidade até um plano horizontal comum a toda a superfície ou manter a descontinuidade existente no limite da malha. A primeira

abordagem implicaria assumir uma geometria não suportada por dados experimentais, enquanto a segunda originaria uma descontinuidade entre a superfície digitalizada e a restante área do leito. Assim, optou-se por considerar apenas a região correspondente à cavidade de erosão e uma pequena extensão a montante do pilar, onde o leito se apresentava relativamente plano e compatível com a restante geometria do leito.

Após a seleção da superfície correspondente à cavidade de erosão, o ficheiro *STL* foi importado para o software *Blender*, onde se procedeu à definição do plano de referência da geometria utilizado para delimitar a geometria da cavidade. Para isso, recorreu-se aos valores experimentais da profundidade máxima de erosão, aplicando essa distância ao ponto mais baixo da cavidade digitalizada de forma a obter um plano correspondente ao leito não erodido. Este plano serviu de base para efetuar o corte da superfície, conservando apenas a geometria da cavidade que se encontrava abaixo dele.

Importa referir que a definição deste plano exigiu a realização de pequenos ajustes à sua cota. Embora a profundidade máxima de erosão fosse conhecida experimentalmente, a nuvem de pontos obtida não continha qualquer referencial altimétrico que permitisse identificar diretamente a posição do leito original, pelo que a geometria resultante foi analisada visualmente e foram efetuados ligeiros ajustes à sua posição vertical com o objetivo de obter uma incorporação mais coerente da cavidade no plano envolvente, resultando futuramente numa melhor geração da malha computacional.

Após esta etapa, realizou-se também uma ligeira suavização da superfície de modo a mitigar pequenas irregularidades resultantes do processo de digitalização, melhorando assim a compatibilização da geometria com o *OpenFOAM* e minimizando potenciais problemas durante a geração da malha computacional, sem alterar de forma significativa a morfologia da cavidade de erosão.

Concluídas as etapas de preparação da geometria, obtiveram-se as superfícies finais utilizadas nas simulações tridimensionais das configurações C1 e C2, presentes na Figura 34.

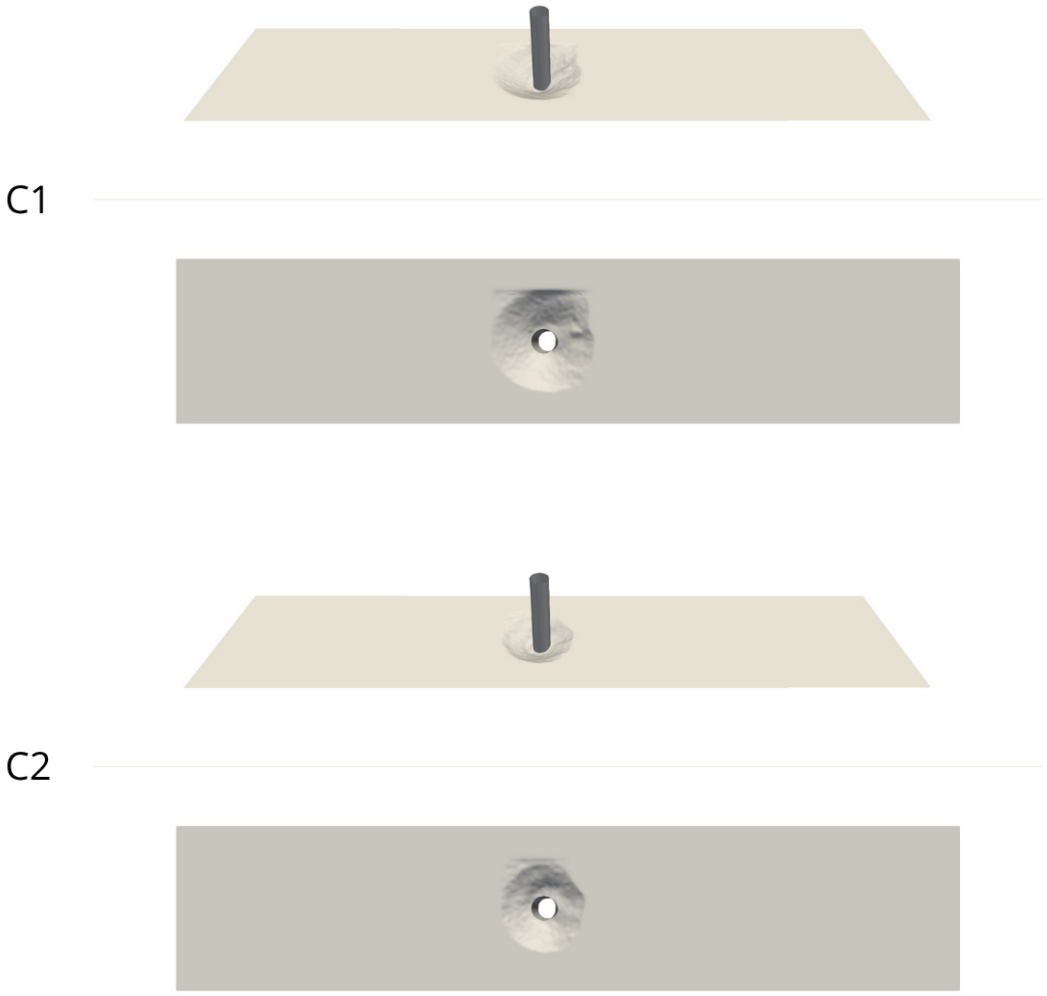


Figura 34 - Geometrias Finais Consideradas para as Configurações C1 e C2

5.3.2 Malhas

Após a definição da geometria e da geração da malha computacional, foram obtidas as malhas finais correspondentes às três configurações de leito consideradas (C0, C1 e C2). A apresenta um corte longitudinal e vertical das malhas finais na resolução mais elevada (*MeshRes5*) geradas para cada uma destas configurações.

Para cada configuração foram consideradas seis resoluções de malha, designadas por *MeshRes0* a *MeshRes5*. O número total de células correspondente a cada resolução e configuração é apresentado na Tabela 9.

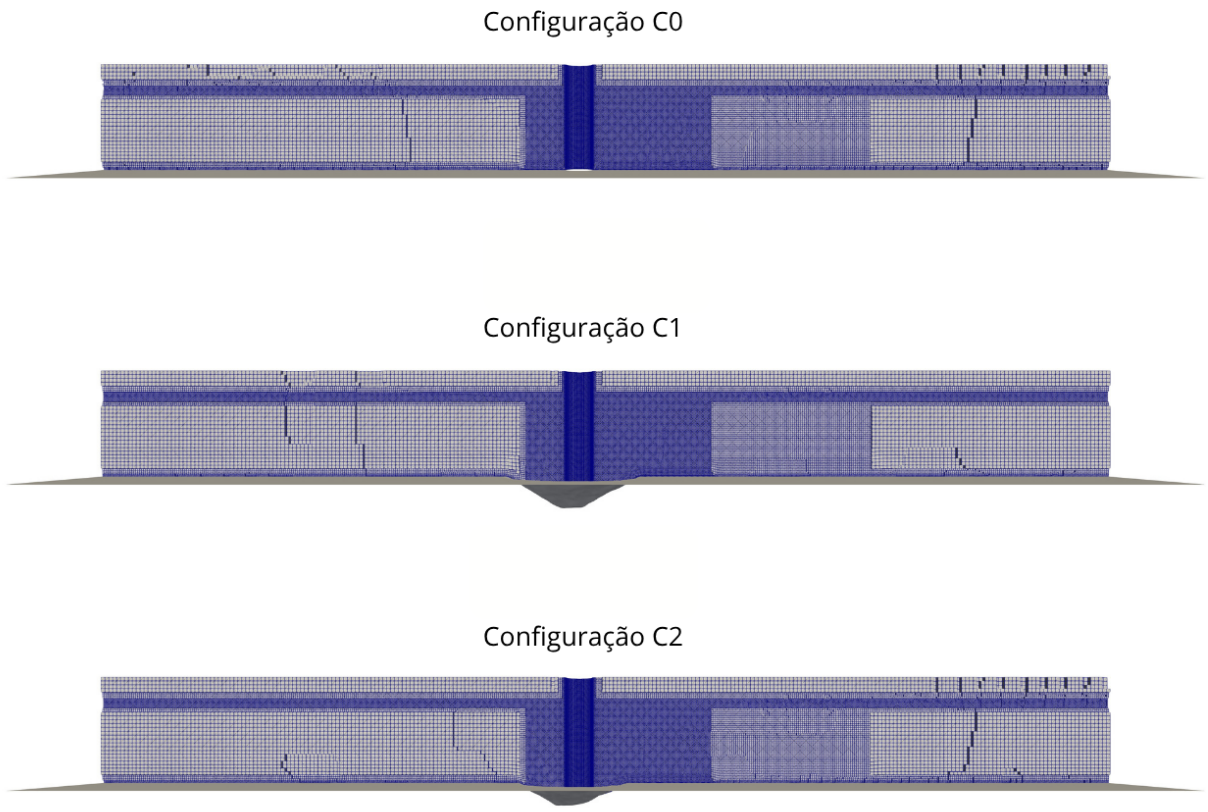


Figura 35 - Corte Longitudinal das Configurações C0, C1 e C2 (MeshRes5)

Tabela 9 - Número de Células por Configuração e Nível de Resolução (Simulações 3D)

Nível de Resolução	Configuração C0	Configuração C1	Configuração C2
MeshRes0	261 844	265 885	264 031
MeshRes1	331 744	346 749	337 559
MeshRes2	727 459	760 050	745 326
MeshRes3	1 280 816	1 341 878	1 316 480
MeshRes4	2 638 040	2 752 336	2 701 806
MeshRes5	5 413 098	5 642 240	5 543 548

5.3.3 Condições de Fronteira

As condições de fronteira adotadas nas simulações tridimensionais foram definidas de forma a representar o funcionamento do canal experimental e a interação do escoamento com os diferentes limites do domínio computacional. Na fronteira de entrada, designada por *inlet*, foi imposto o caudal correspondente às condições do ensaio de acordo com o perfil vertical da Figura 25, enquanto na fronteira de saída, *outlet*, foi considerada a saída do mesmo caudal.

O pilar, o leito e as paredes laterais do canal, identificados respetivamente por *cylinder*, *bed* e *side walls*, foram definidos como parede. A fronteira superior, designada por *atmosphere*, foi considerada aberta, permitindo a entrada e a saída de ar em função das condições de pressão. As funções atribuídas a cada fronteira encontram-se sintetizadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Condições de Fronteira das Simulações 3D

Fronteira	Função
inlet	entrada de caudal de 10.8 L/s
outlet	saída de caudal de 10.8 L/s
cylinder	parede
bed	parede
side walls	parede
atmosphere	entrada e saída de ar em função da pressão

Por questões de concisão, apenas se apresentam nesta secção as funções associadas a cada fronteira.

5.3.4 Definições Numéricas

As simulações tridimensionais foram realizadas durante um período de 200 s, garantindo um intervalo suficiente para o desenvolvimento e estabilização do escoamento. Ao longo das simulações, o número de *Courant* foi mantido inferior a 0.9, contribuindo para a estabilidade numérica da solução. Este parâmetro adimensional representa a razão entre a distância percorrida pelo fluido durante um passo temporal e a dimensão característica das células da malha. Verificou-se que, após aproximadamente 100 s, o escoamento apresentava um comportamento estabilizado, pelo que apenas os resultados correspondentes ao intervalo compreendido entre 100 e 200 s foram considerados na análise apresentada no Capítulo 6.

Para o acoplamento entre pressão e velocidade foi utilizado o algoritmo *PISO*, amplamente utilizado em simulações transientes no *OpenFOAM*. Os esquemas utilizados para a discretização dos diferentes termos das equações governantes foram definidos no ficheiro *fvSchemes*. Na discretização temporal foi adotado o esquema de *Euler*, enquanto os termos espaciais foram tratados através de diferentes esquemas, selecionados em função da variável e do termo consi-

derado. As principais definições numéricas utilizadas nas simulações tridimensionais encontram-se sintetizadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Modelos Numéricos Utilizados nas Simulações 3D (*fvSchemes*)

	Entrada	**Esquema Adotado**
Discretização temporal	ddtSchemes	Euler
Termos de Divergência (*divSchemes*)	div(rhoPhi,U)	Gauss limitedLinearV 1.0
	div(phi,alpha)	Gauss vanLeer
	div(phirb,alpha)	Gauss interfaceCompression
	div\(phi,(k|omega)	Gauss limitedLinear 1.0
	div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U)))))	Gauss linear

6
ANÁLISE DE RESULTADOS

O presente capítulo tem como objetivo apresentar e interpretar os resultados obtidos nas simulações bidimensionais e tridimensionais cuja metodologia está descrita no Capítulo 5 da dissertação. Para poder visualizar os resultados numéricos obtidos nas simulações de *OpenFOAM*, recorrer-se-á ao software *ParaView* tendo sido utilizada a versão 5.13.3.

6.1 SIMULAÇÕES 2D

Conforme referido no Capítulo 5, as simulações bidimensionais constituíram a primeira etapa do estudo numérico do escoamento em torno do pilar cujos principais objetivos consistiram na aprendizagem da utilização do OpenFOAM e na avaliação da capacidade do modelo 2D em reproduzir os principais fenómenos hidrodinâmicos característicos do escoamento, reconhecendo-se, contudo, as limitações inerentes a uma abordagem bidimensional face a uma modelação tridimensional. Numa primeira fase, será apresentado a análise da influência da resolução da malha com o objetivo de avaliar a influência da resolução da malha. De seguida, procede-se à análise da evolução temporal do campo de velocidades, recorrendo à visualização dos resultados numéricos através do *ParaView* possibilitando a caracterização e identificação dos fenómenos ocorrentes no escoamento.

6.1.1 Estudo da Influência da Resolução da Malha

A análise de independência da malha constitui uma etapa fundamental na modelação numérica, devendo ser realizada sempre que possível e tendo em consideração as condições de escoamento simuladas. Neste trabalho, esta análise permitiu avaliar a influência do aumento progressivo da resolução da malha nos resultados obtidos e identificar o nível de refinamento a partir

do qual as diferenças se tornavam pouco significativas. Deste modo, foi possível selecionar uma resolução capaz de representar adequadamente o escoamento, sem impor um aumento desnecessário do custo computacional e do tempo de simulação.

Foram comparadas cinco malhas com diferentes níveis de resolução, mantendo-se inalteradas a geometria do domínio, os modelos físicos e as condições de simulação. A Figura 36 apresenta as diferentes malhas utilizadas para as simulações 2D realizadas. Com base na sua análise, é possível visualizar as diferenças entre as diferentes malhas, nomeadamente ao nível da resolução da malha global e do refinamento aplicado na proximidade do pilar e na região da esteira.

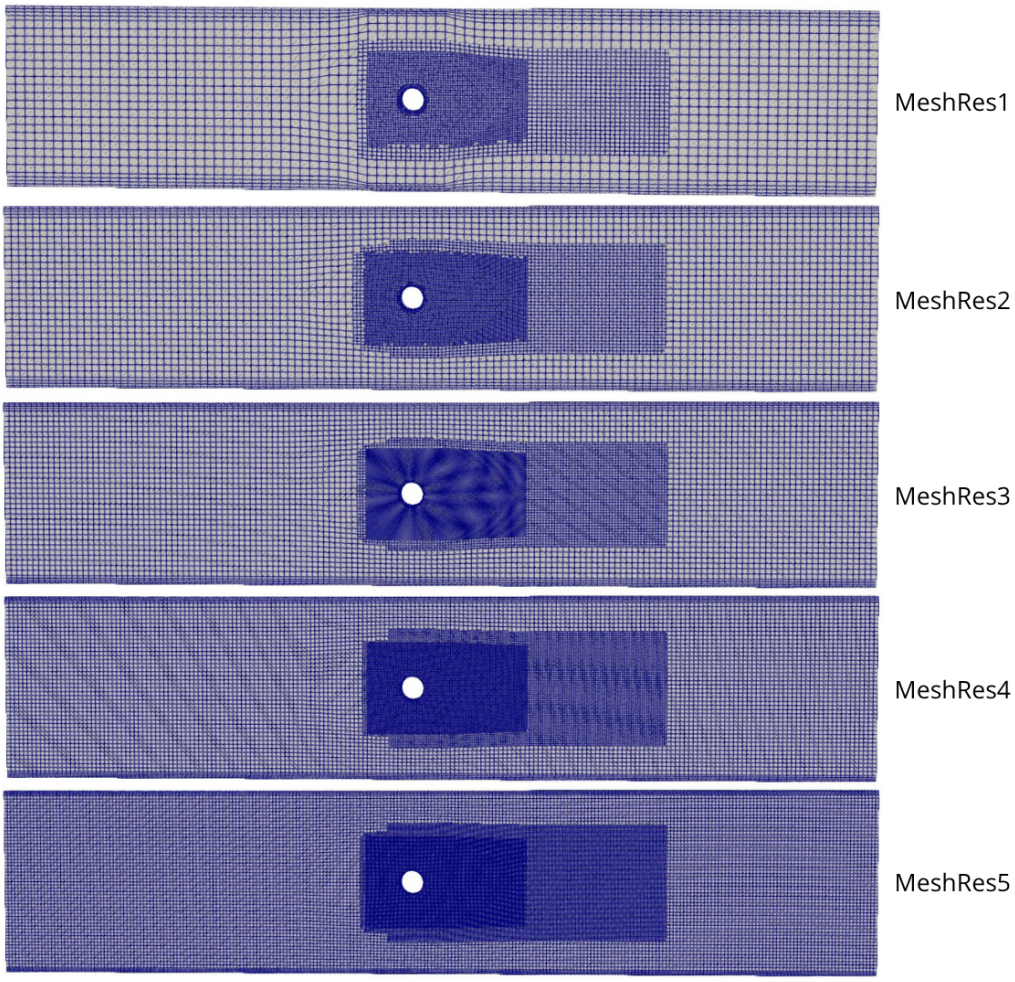


Figura 36 - Malhas Utilizadas nas Simulações 2D

De modo a complementar a análise das malhas, procedeu-se à monitorização de diferentes parâmetros inerentes ao escoamento. A Tabela 12 apresenta o número de células de cada malha,

o valor médio do coeficiente de arrastamento, o valor máximo do coeficiente de sustentação, a frequência de desprendimento dos vórtices e o número de *Strouhal* para cada nível de resolução. O coeficiente de arrastamento foi analisado através do seu valor médio, uma vez que esta grandeza representa a ação longitudinal global exercida pelo escoamento sobre o pilar e tende a oscilar em torno de um valor positivo aproximadamente constante após o estabelecimento do regime desenvolvido. Por sua vez, para o coeficiente de sustentação considerou-se o valor máximo dado que este parâmetro varia alternadamente entre valores positivos e negativos devido ao desprendimento periódico dos vórtices, apresentando um valor médio próximo de zero. Desse modo, o valor máximo permite caracterizar de forma mais representativa a amplitude das forças transversais atuantes sobre o pilar.

Tabela 12 - Parâmetros avaliados nas Simulações 2D

Nível de Resolução	N.º de Células	C_D médio	C_L máximo	Frequência (Hz)	N.º de *Strouhal*
1	5925	1.130	0.866	0.899	0.250
2	9721	1.294	1.159	0.900	0.250
3	15074	1.510	1.523	0.900	0.250
4	25132	1.560	1.647	0.900	0.250
5	41294	1.563	1.675	0.90	0.250

Com base nos valores da Tabela 12, são apresentados também os gráficos que traduzem a relação entre o número de células e o valor médio do coeficiente de arrastamento e o valor máximo do coeficiente de sustentação nas Figuras Figura 37 e Figura 38.

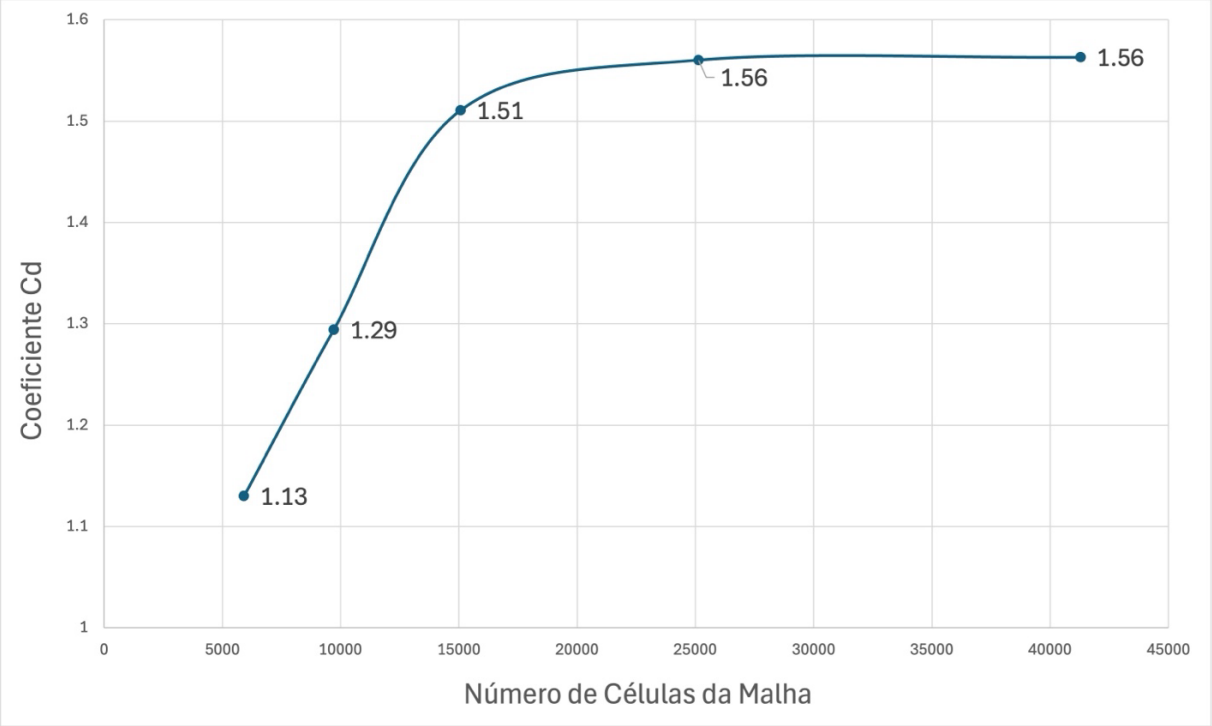


Figura 37 - Evolução do C_D médio em Função do Número de Células

De acordo com a Figura 37, observa-se um aumento significativo do coeficiente de arrastamento entre as primeiras três resoluções. Entre a *MeshRes3* e a *MeshRes4* regista-se ainda uma variação de 3.3%, reduzindo-se para 0.2% entre a *MeshRes4* e a *MeshRes5*. Deste modo, considera-se que a convergência do parâmetro é atingida a partir da *MeshRes4* (25132 células), sendo reduzida a influência da resolução adicional da malha além deste nível de resolução.

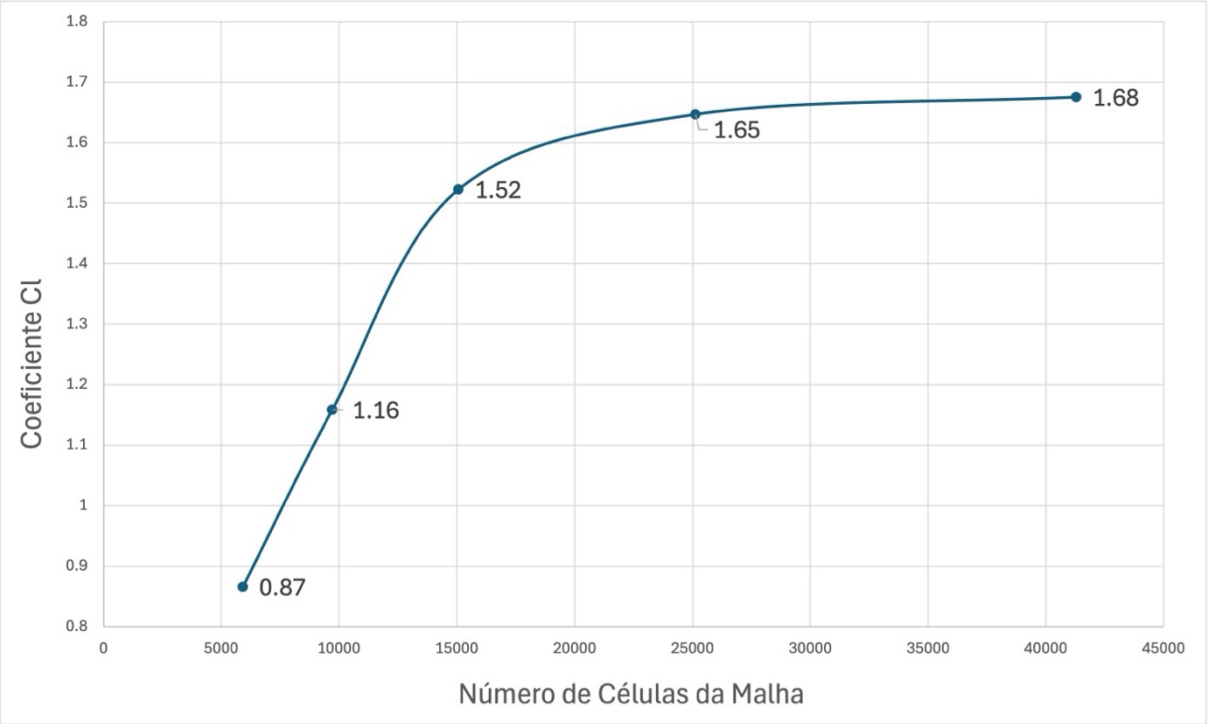


Figura 38 - Evolução do C_L máximo em Função do Número de Células

Para o coeficiente de sustentação observa-se uma tendência semelhante, ainda que a estabilização seja atingida ligeiramente mais tarde. A variação reduz-se de 8.1% entre a *MeshRes3* e a *MeshRes4* para 1.7% entre a *MeshRes4* e a *MeshRes5*, confirmando, tal como no coeficiente de arrastamento, a *MeshRes4* como o nível de resolução a partir do qual a resolução da malha deixa de ter uma influência significativa nos resultados.

Além disso, de acordo com a Tabela 12, é notória a estabilização do número de *Strouhal* nas cinco resoluções. O facto deste parâmetro não variar ao longo das cinco resoluções indica que a resolução da malha não influencia a frequência de desprendimento dos vórtices, reforçando a consistência da solução numérica.

6.1.2 Análise do Campo de Velocidades

Para a análise do campo de velocidades foi utilizada a malha *MeshRes3*. Esta escolha resulta de uma limitação computacional e não do nível de convergência dos parâmetros avaliados no subcapítulo anterior, uma vez que a *MeshRes3* foi a malha de maior refinamento cuja simulação pôde ser executada de forma contínua desde o instante inicial até aos 70 segundos, sem recurso

à função *mapFields*. As malhas *MeshRes4* e *MeshRes5*, apesar de apresentarem uma melhor convergência do C_D médio e do C_L máximo, só puderam ser simuladas a partir desse instante por mapeamento do campo de escoamento da malha anterior, a *MeshRes4* entre os 70 e os 90 segundos e a *MeshRes5* entre os 90 e os 110 segundos, não dispondo por isso do histórico completo da evolução do escoamento desde o instante inicial. A *MeshRes3* constitui, deste modo, a única malha que permite acompanhar de forma contínua e integral a evolução temporal do escoamento, sendo por essa razão a base da análise apresentada de seguida.

No instante inicial, t = 0.5 s (Figura 39), o escoamento ainda se encontra na sua fase inicial, sendo possível observar o aumento da velocidade junto às laterais do pilar devido à redução da secção disponível. Simultaneamente, é também notório o aparecimento de uma pequena região de velocidades baixas imediatamente a jusante do pilar que corresponde ao início da formação da zona de recirculação. No entanto, o escoamento apresenta uma distribuição aproximadamente simétrica, não se observando ainda qualquer desprendimento de vórtices.

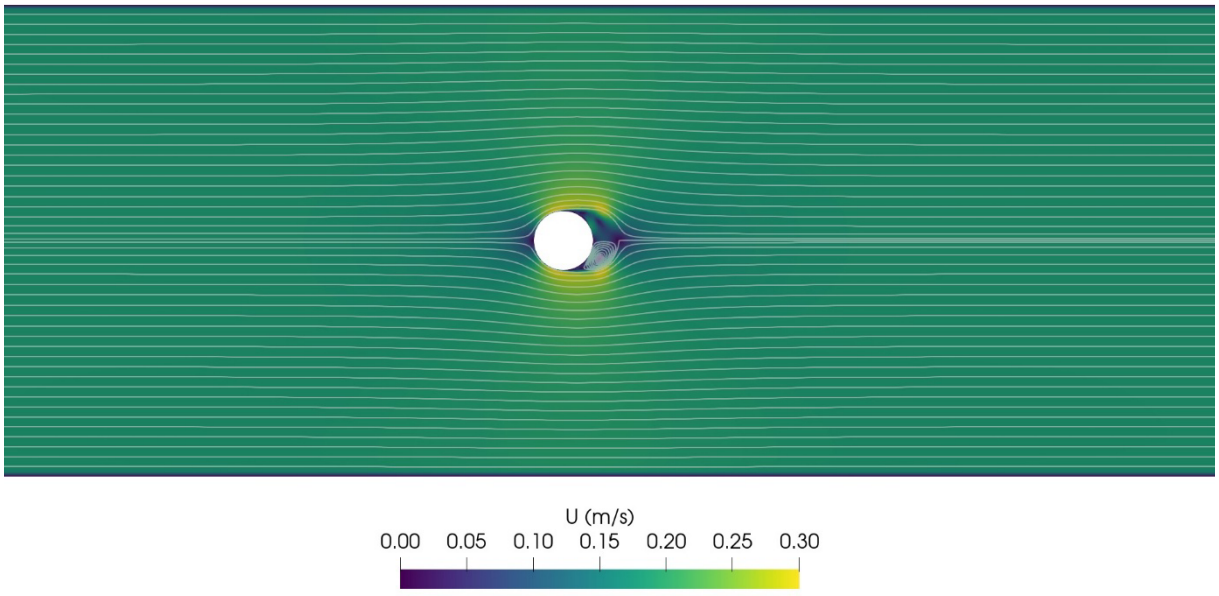


Figura 39 – Simulação 2D - Campo de Velocidades (t=0.5s)

Conforme a simulação vai evoluindo no tempo, a região de circulação vai aumentando e vai diminuindo de forma progressiva a simetria do escoamento. A Figura 40 apresenta o campo de velocidades no instante t = 15 s onde é possível observar a separação do escoamento nas faces

laterais do pilar. É também evidenciada a presença do desprendimento alternado dos primeiros vórtices assimétricos através da ondulação já constante das linhas de corrente, indicando o início do processo dos vórtices de *von Kármán*, um fenómeno que ocorre quando um fluido encontra a presença de um obstáculo causando a formação de padrões cíclicos de vórtices a jusante do obstáculo. Nesta fase, as velocidades mais elevadas são predominantes nas faces laterais do pilar enquanto as velocidades menores encontram-se na região da esteira e nos vórtices em desenvolvimento.

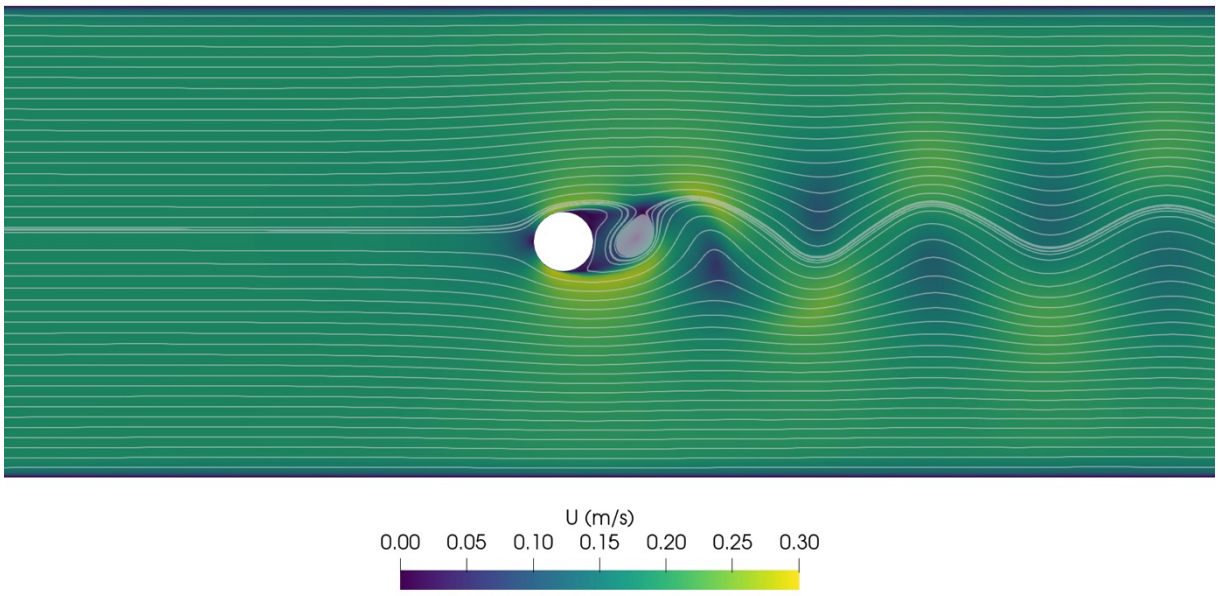


Figura 40 - Simulação 2D - Campo de Velocidades (t=15s)

A Figura 41 apresenta o estado final do campo de velocidades da simulação, no qual já é possível verificar a existência de um regime de desprendimento de vórtices periódico bem estabelecido correspondentes aos vórtices de *von Kármán* que se propagam ao longo de todo o domínio. Com base nas linhas de corrente, é também possível visualizar de forma clara a ondulação periódica característica deste fenómeno.

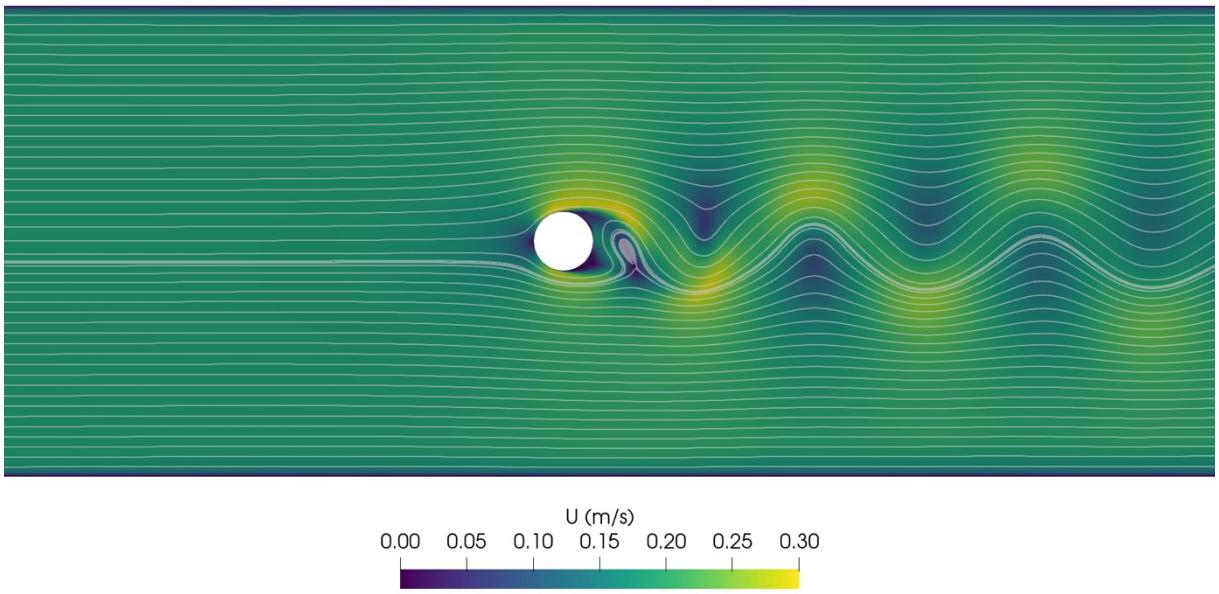


Figura 41 - Simulação 2D - Campo de Velocidades (t=70s)

Na presente simulação obteve-se um valor da frequência de desprendimento dos vórtices de 0.9 Hz, correspondendo a um número de *Strouhal* de 0.25. Estes valores não distam muito dos valores teóricos estimados para o caso experimental onde, para um número de *Strouhal* considerado de 0.2, se obteve um valor de frequência de 0.72 Hz. Estas diferenças podem ser explicadas pelo facto de a simulação bidimensional não reproduzir na íntegra os fenómenos presentes no escoamento, como por exemplo os vórtices que se formam na proximidade do pilar. Apesar disso, a ordem de grandeza entre os valores é coerente o que demonstra a fiabilidade do modelo em reproduzir corretamente o escoamento.

6.2 SIMULAÇÕES 3D

6.2.1 Configuração C0 - sem Cavidade de Erosão

Os resultados apresentados nesta subsecção referem-se à configuração sem a cavidade de erosão, ou seja, com o leito plano, utilizando a malha de maior resolução. A análise baseia-se na visualização dos campos de velocidade obtidos, para o último instante de simulação, (t = 200 s),

em dois planos: um corte horizontal a meia profundidade (z = 0.075 m) (Figura 42) e a um corte longitudinal a meio do eixo (y = 0 m) (Figura 43).

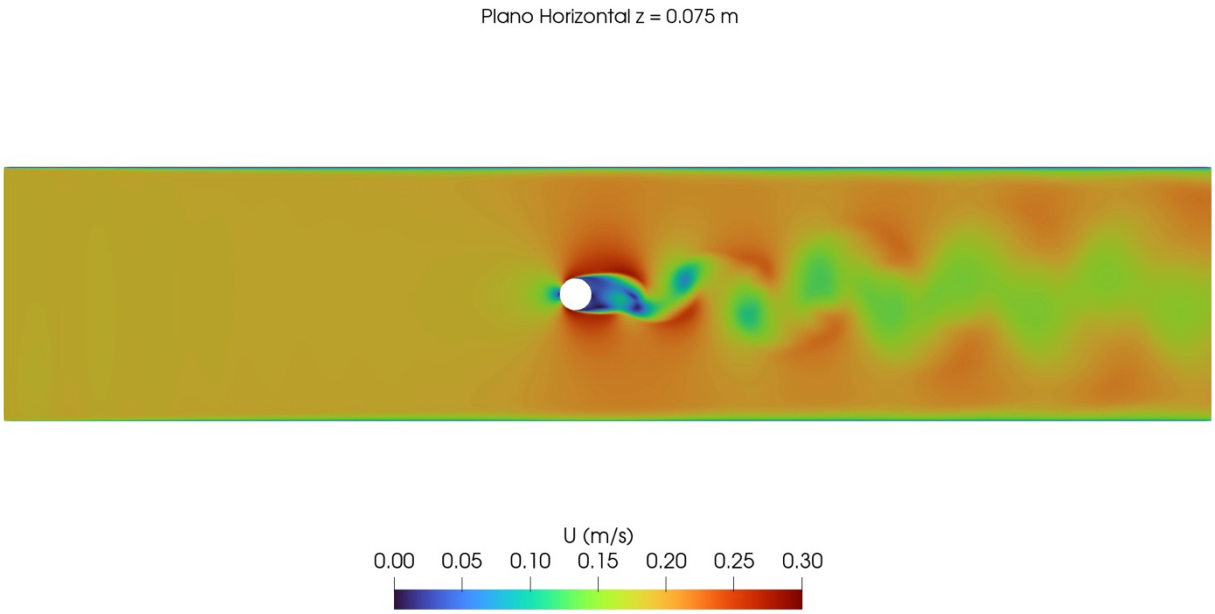


Figura 42 - Campo de Velocidades no Plano Horizontal (z = 0.075 m) na Configuração C0 (t = 200 s)

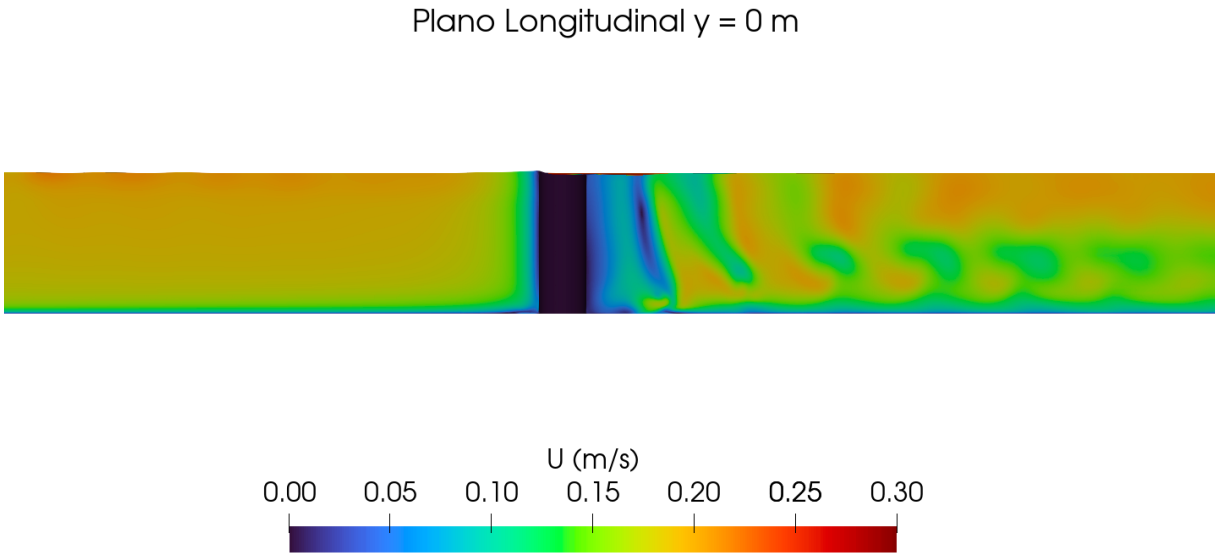


Figura 43 - Campo de Velocidades no Plano Longitudinal (y = 0 m) na Configuração C0 (t = 200 s)

No plano horizontal (Figura 42), o escoamento apresenta-se aproximadamente uniforme a montante do pilar, sendo apenas perturbado na sua proximidade imediata. Na face de montante forma-se uma região de reduzida velocidade, associada à estagnação do escoamento, enquanto

junto às faces laterais se verifica uma aceleração localizada, decorrente do desvio do escoamento em torno do obstáculo. A jusante desenvolve-se uma esteira bem definida, inicialmente marcada por uma zona alongada de velocidades reduzidas imediatamente atrás do pilar.

Com o afastamento ao obstáculo, a esteira passa a apresentar uma alternância clara entre regiões de maior e menor velocidade, distribuídas de forma sucessiva em torno do eixo do canal. Esta organização evidencia o desprendimento alternado de estruturas turbulentas e a natureza não permanente do escoamento a jusante.

No plano longitudinal, apresentado na Figura 43, confirma-se uma redução acentuada da velocidade imediatamente a jusante do pilar, formando-se uma região de défice de velocidade que ocupa uma parcela considerável da altura do escoamento. A distribuição das velocidades revela ainda uma sucessão de perturbações ao longo da esteira, com zonas alternadas de menor e maior velocidade que se prolongam para jusante. Próximo do leito, a velocidade permanece inferior à observada no núcleo do escoamento, devido ao desenvolvimento da camada limite junto à fronteira sólida.

A montante, a aproximação ao pilar provoca igualmente uma desaceleração progressiva do escoamento, mais evidente junto à face frontal do obstáculo. A jusante, a esteira apresenta uma estrutura vertical complexa, não se limitando à região próxima do leito nem à superfície livre. Esta distribuição mostra que a influência do pilar se estende ao longo de praticamente toda a coluna de água, embora a intensidade das perturbações diminua gradualmente com a distância.

Para complementar a análise dos campos de velocidade, apresenta-se na Figura 44 uma representação tridimensional das linhas de corrente, permitindo visualizar a trajetória do escoamento na proximidade do pilar e o desenvolvimento da esteira a jusante.

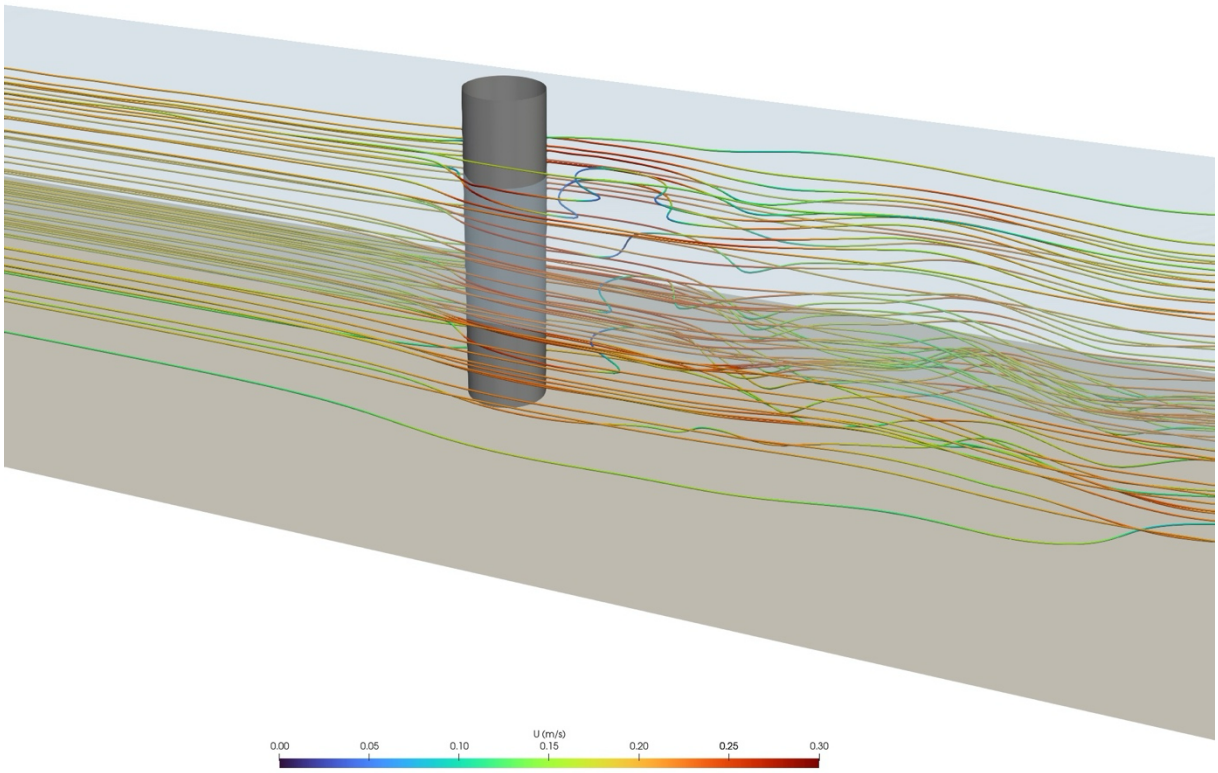


Figura 44 - Linhas de Corrente na Proximidade do Pilar na Configuração C0 (t = 200 s)

De acordo com a Figura 44, antes de atingirem o pilar, as linhas de corrente apresentam trajetórias aproximadamente paralelas e uniformes. Após contornarem o obstáculo, desenvolve-se a esteira, onde as linhas passam a apresentar oscilações e desvios de trajetória associados às estruturas turbulentas. Apesar destas perturbações, as linhas de corrente conservam uma organização global bem definida, mantendo um padrão relativamente regular e recuperando gradualmente uma orientação aproximadamente paralela ao escoamento principal à medida que aumenta a distância ao pilar.

6.2.2 Configuração C1 - com Uma Camada de Areia Fina

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos para a configuração do leito com uma cavidade de erosão desenvolvida apenas em areia fina, FS1. A análise foca-se nos resultados correspon-

dentes ao último instante de simulação (200 s), assumindo-se que o escoamento se encontra estabilizado.

As Figuras Figura 45 e Figura 46 apresentam a distribuição da velocidade em dois planos: um corte horizontal localizado a meia profundidade do escoamento (z = 0.075 m) e um plano longitudinal coincidente com o eixo médio do canal (y = 0 m), respetivamente. Esta análise permite caracterizar a evolução do campo de velocidades em torno do pilar e no interior da cavidade de erosão.

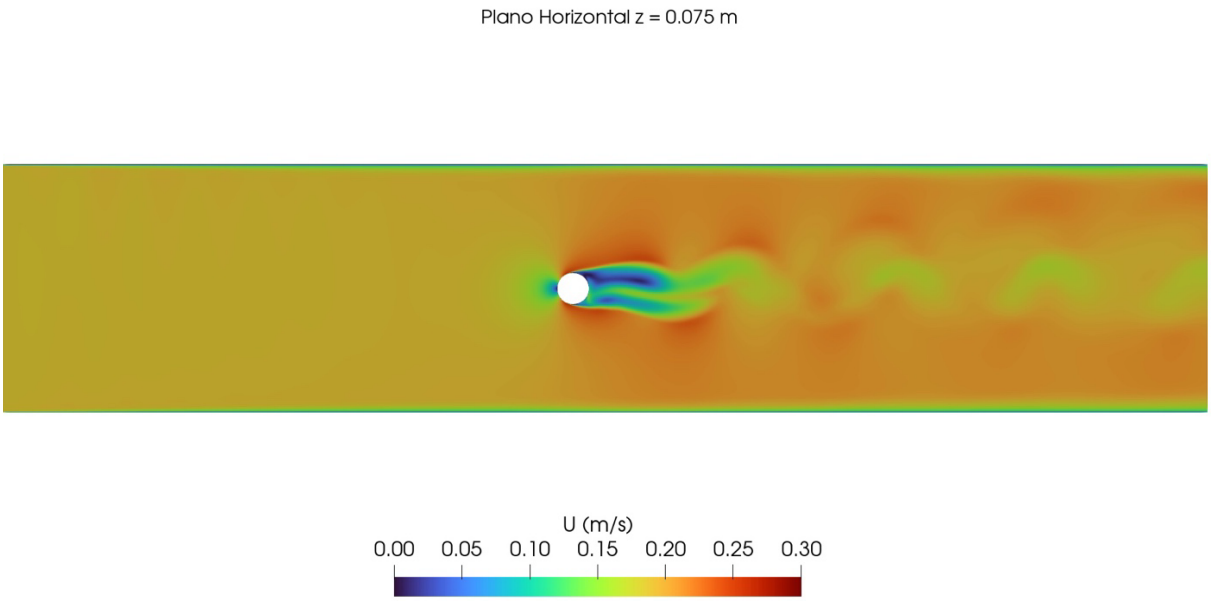


Figura 45 - Campo de Velocidades no Plano Horizontal (z = 0.075 m) na Configuração C1 (t = 200 s)

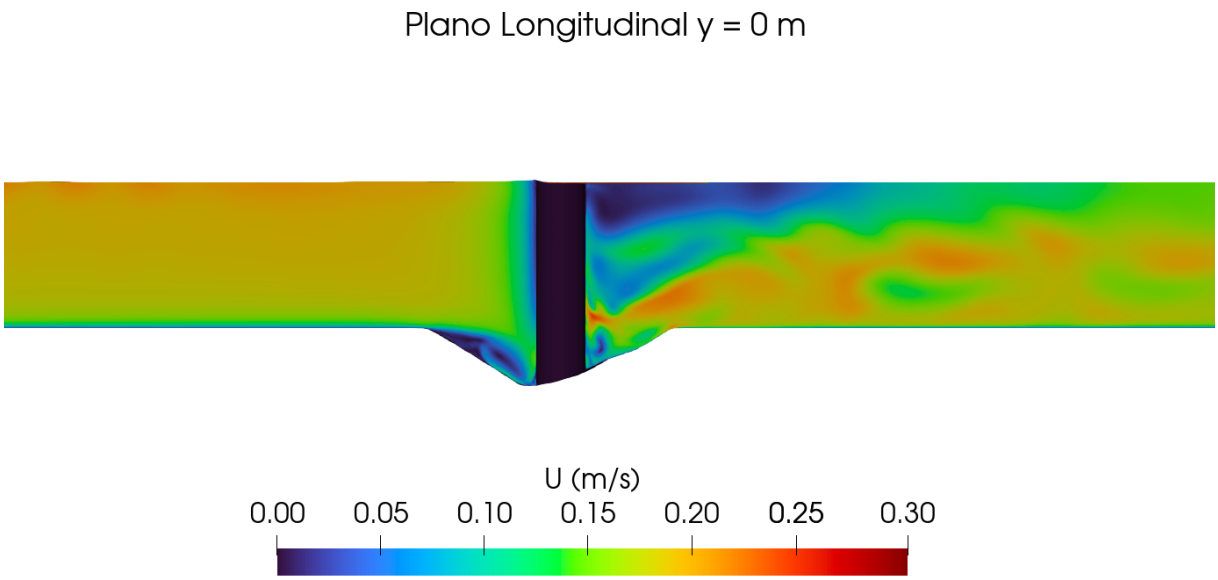


Figura 46 - Campo de Velocidades no Plano Longitudinal (y = 0 m) na Configuração C1 (t = 200 s)

Com base na análise da Figura 45, observa-se que à medida que o escoamento se aproxima do pilar, ocorre uma redução gradual da velocidade na região imediatamente a montante, formando uma zona de estagnação associada ao aumento de pressão local. Simultaneamente, verifica-se uma aceleração significativa do escoamento junto às faces laterais do pilar, onde as velocidades atingem o valor de 0.25 m/s aproximadamente, um valor cerca de 1.4 vezes superior à velocidade média do escoamento de entrada (0.18 m/s), justificado pela redução da secção disponível, forçando o escoamento a contornar o obstáculo com uma velocidade superior. Além disso, ainda no plano horizontal, é notória a formação de uma região de baixa velocidade imediatamente a jusante do pilar, correspondente à separação do escoamento e ao desenvolvimento da esteira. A partir desta zona verifica-se uma recuperação gradual da velocidade ao longo do canal, embora se mantenham algumas perturbações ao longo do campo de velocidades resultantes da instabilidade do escoamento.

A Figura 46 evidencia a influência da geometria da cavidade de erosão no desenvolvimento do escoamento. Confere-se que a corrente principal permanece concentrada na zona da coluna de água acima de z = 0 m, enquanto no interior da cavidade as velocidades diminuem significativamente, principalmente junto ao leito. Esta redução da velocidade resulta da expansão da secção do escoamento proporcionada pela cavidade e favorece o aparecimento de zonas de circulação de baixa energia no seu interior.

Paralelamente, é ainda possível observar que a transição entre o escoamento principal e a região de baixas velocidades ocorre através de uma zona de forte gradiente de velocidade, particularmente evidente na parte superior da cavidade. Esta zona estabelece a ligação entre a corrente principal e as regiões de recirculação existentes no interior da velocidade, promovendo a transferência de quantidade de movimento entre ambas.

A Figura 47 apresenta as linhas de corrente do escoamento para o último instante de simulação (t = 200 s) com vista numa melhor compreensão das estruturas do escoamento que se formam no interior da cavidade de erosão e na proximidade do pilar.

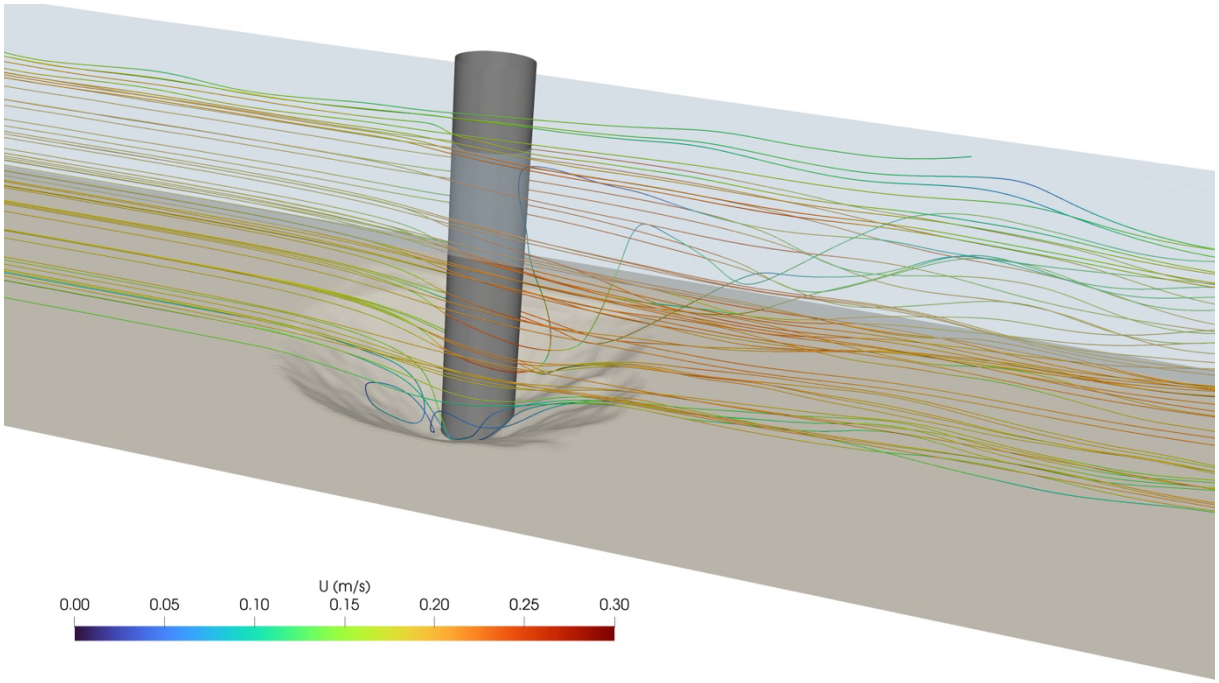


Figura 47 - Linhas de Corrente na Proximidade do Pilar na Configuração C1 (t = 200 s)

Através da análise da Figura 47, é possível identificar os fenómenos hidrodinâmicos associados a escoamentos em torno de pilares. A montante do pilar, as linhas de corrente apresentam-se praticamente paralelas ao leito, confirmando a estabilização do escoamento antes da interação com o obstáculo. À medida que o escoamento se aproxima do pilar, as trajetórias do escoamento convergem e desviam-se para as laterais, refletindo-se numa aceleração do escoamento junto às faces laterais do pilar, conforme referido anteriormente.

Já nas regiões próximas da cavidade, observa-se uma convergência das linhas de corrente para o seu interior, sendo possível a identificação do vórtice de ferradura no interior da cavidade e evidenciando que uma parte do escoamento tende a originar estruturas turbulentas complexas nessa região.

A jusante do pilar, desenvolve-se a esteira, caracterizada pela separação do escoamento e pela presença de trajetórias irregulares devido aos vórtices formados. Com o aumento da distância ao obstáculo, as perturbações induzidas pelo pilar vão se dissipando de forma gradual, conduzindo a uma recuperação gradual da orientação das linhas de corrente segundo a direção do escoamento.

6.2.3 Configuração C2 - com Duas Camadas de Areia

Nesta subsecção apresentam-se os resultados obtidos para a configuração do leito cuja cavidade de erosão é formada por duas camadas de sedimentos, uma areia grossa na camada superior e uma areia fina na camada inferior. Tal como nas configurações anteriores, os resultados apresentados correspondem ao último instante de simulação (t = 200 s).

A Figura 48 e Figura 49 correspondem aos campos de velocidades num plano horizontal a uma distância de 0.075 m do leito e a um corte longitudinal através do eixo médio do leito, respetivamente.

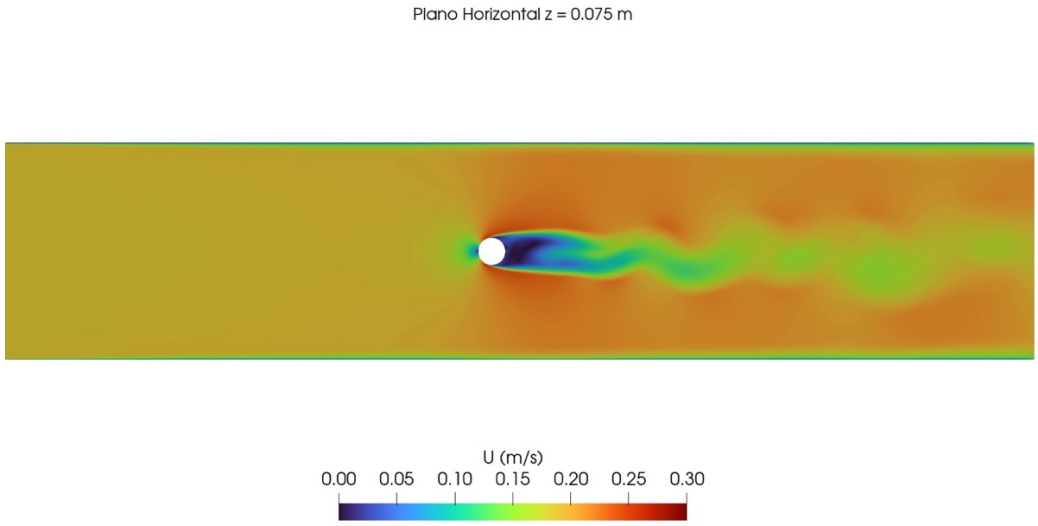


Figura 48 - Campo de Velocidades no Plano Horizontal (z = 0.075 m) na Configuração C2 (t = 200 s)

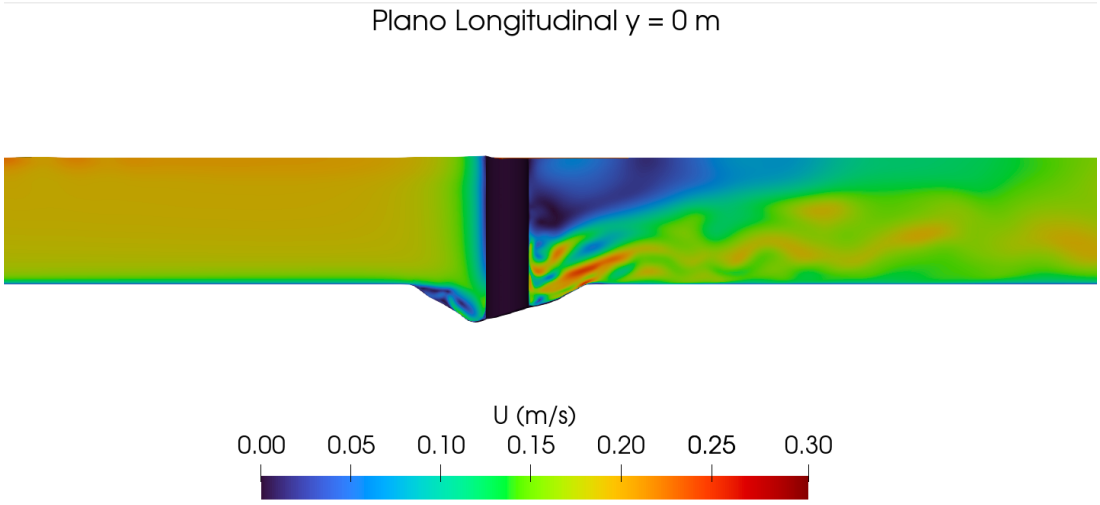


Figura 49 - Campo de Velocidades no Plano Longitudinal na Configuração C2 (t = 200 s)

De um modo geral, o padrão de escoamento em torno do pilar é análogo ao descrito para a configuração C1, com a formação de uma zona de estagnação a montante, a aceleração do escoamento junto às faces laterais do pilar e o desenvolvimento de uma esteira a jusante (Figuras Figura 48 e Figura 49). No plano horizontal, distingue-se uma diferença na organização da zona de recirculação imediatamente a jusante do pilar, que em C2 se bifurca mais cedo, dando lugar ao padrão oscilatório característico da esteira mais próximo do obstáculo do que em C1, onde essa zona se mantém como uma estrutura contínua ao longo de uma distância maior antes de se iniciar a oscilação. No plano longitudinal, o comportamento no interior da cavidade, com velocidades reduzidas e uma recuperação gradual a jusante, não apresenta diferenças substanciais face ao observado em C1.

A interpretação do campo de velocidades é complementada pela análise das linhas de corrente tridimensionais (Figura 50), que permitem evidenciar a organização das trajetórias do escoamento induzidas pela presença do pilar.

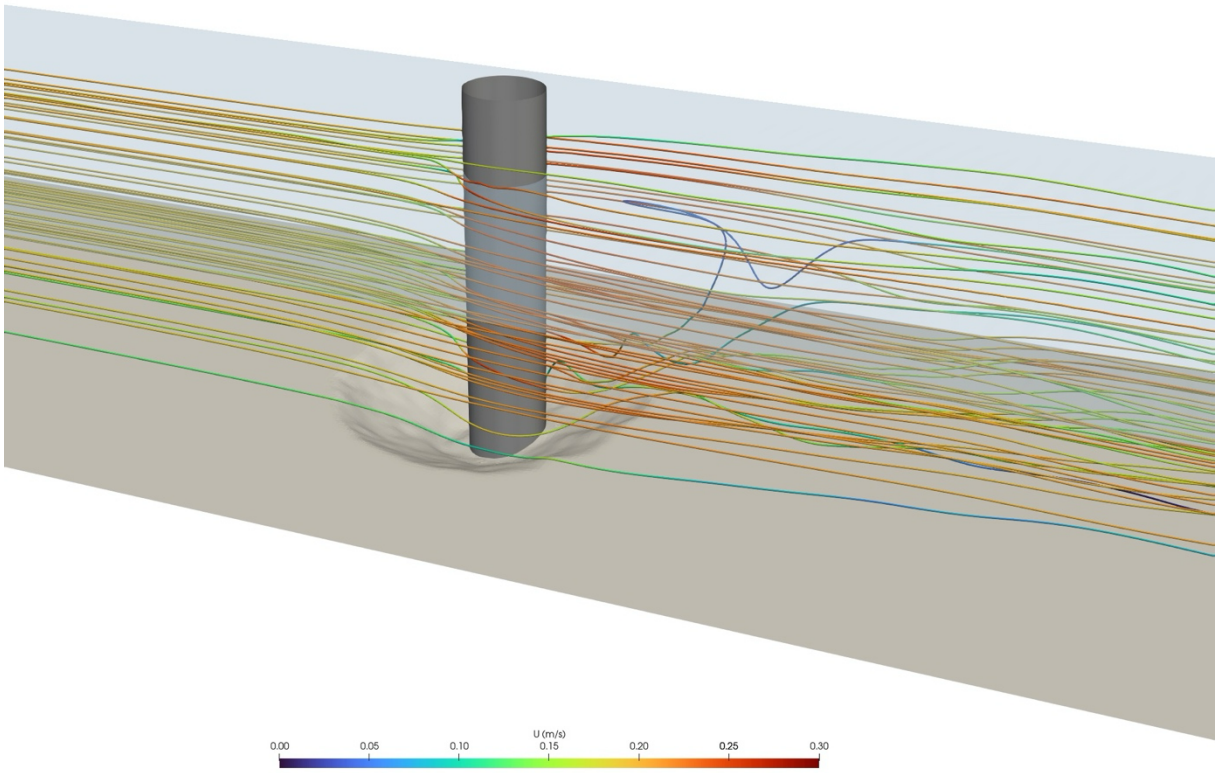


Figura 50 - Linhas de Corrente na Proximidade do Pilar na Configuração C2 (t = 200 s)

A montante, as linhas de corrente apresentam uma disposição aproximadamente paralela, curvando-se progressivamente à medida que se aproximam do pilar. Neste instante, algumas das trajetórias próximas do leito evidenciam uma deflexão descendente em direção à cavidade, associada à perturbação provocada pela presença do pilar.

No interior da cavidade, observam-se trajetórias com desenvolvimento tridimensional, incluindo linhas de corrente que descem junto ao pilar, percorrem a zona inferior da depressão e voltam a ascender a jusante. Contudo, por se tratar da representação de um único instante, a ausência de trajetórias fechadas não permite concluir que não existam movimentos de recirculação nesta região.

A jusante do pilar, as linhas de corrente revelam desvios nas direções vertical e transversal, evidenciando a perturbação do escoamento na zona de esteira. Ainda assim, a análise desta imagem deve ser entendida como uma caracterização instantânea, não permitindo retirar conclusões definitivas sobre a persistência ou a evolução temporal destas estruturas.

6.2.4 Identificação das Principais Estruturas do Escoamento

A análise apresentada nas subsecções anteriores permitiu caracterizar a distribuição das velocidades e as principais características do escoamento nas diferentes configurações abordadas. Contudo, a interação do escoamento com o pilar dá origem a diferentes estruturas específicas, cuja identificação é essencial para compreender os mecanismos hidrodinâmicos associados à erosão localizada.

Nesta subsecção procede-se à identificação das principais estruturas características do escoamento em torno do pilar, nomeadamente o vórtice em ferradura, o escoamento descendente e os vórtices de esteira, para cada configuração.

Conforme ilustrado na Figura 51, o fenómeno dos vórtices em ferradura é observado nas três configurações analisadas, desenvolvendo-se em torno da base do pilar e contornando-o lateralmente. Embora apresente diferentes disposições, observa-se em todos os casos uma estrutura turbulenta associada ao desvio do escoamento junto ao leito. A ação contínua desta estrutura sobre a região envolvente da base do pilar favorece assim a mobilização dos sedimentos, constituindo um dos principais mecanismos responsáveis pelo início e desenvolvimento da erosão.

De acordo com as Figuras Figura 52 e Figura 53, os vórtices de esteira desenvolvem-se a jusante do pilar nas três configurações analisadas, resultando da separação do escoamento após a passagem pelo obstáculo. Estas estruturas apresentam uma organização tridimensional característica, propagando-se ao longo da esteira e contribuindo para a elevada turbulência observada nesta região. Apesar de se verificarem diferenças na sua extensão e organização espacial entre as configurações, a presença destes vórtices é evidente nos três casos, constituindo um dos principais mecanismos responsáveis pela dissipação de energia e pela recuperação progressiva do escoamento a jusante do pilar.

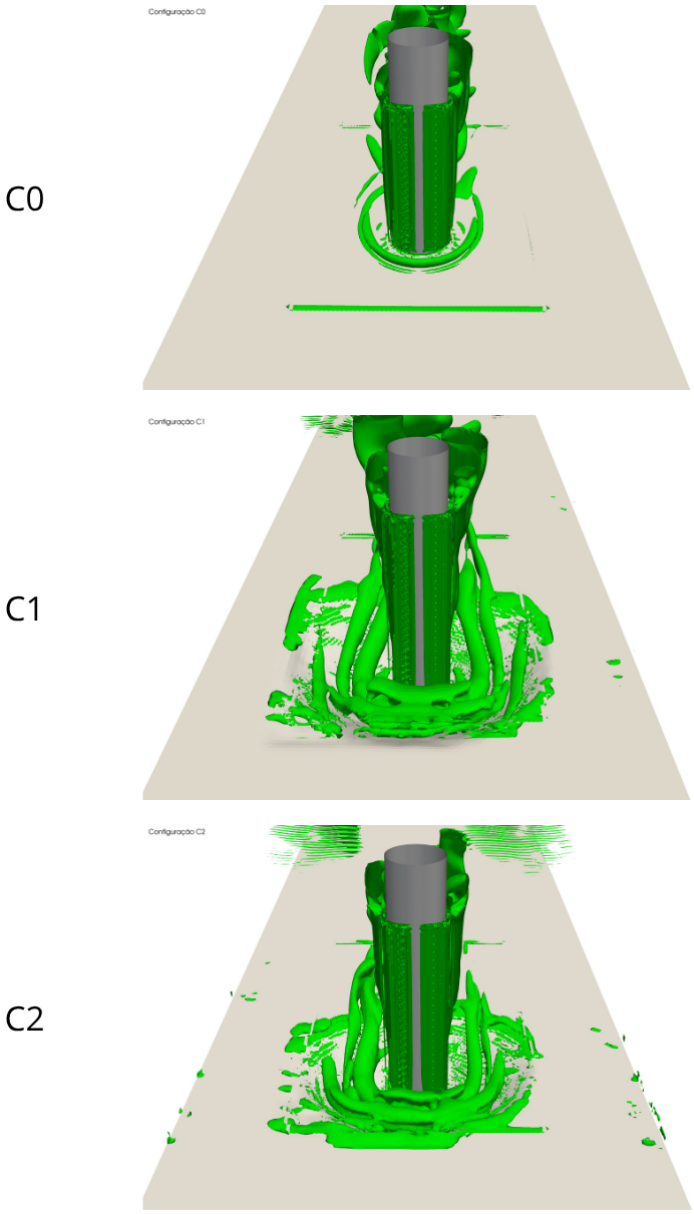


Figura 51 - Vista Tridimensional do Vórtice em Ferradura nas 3 Configurações (t = 200 s)

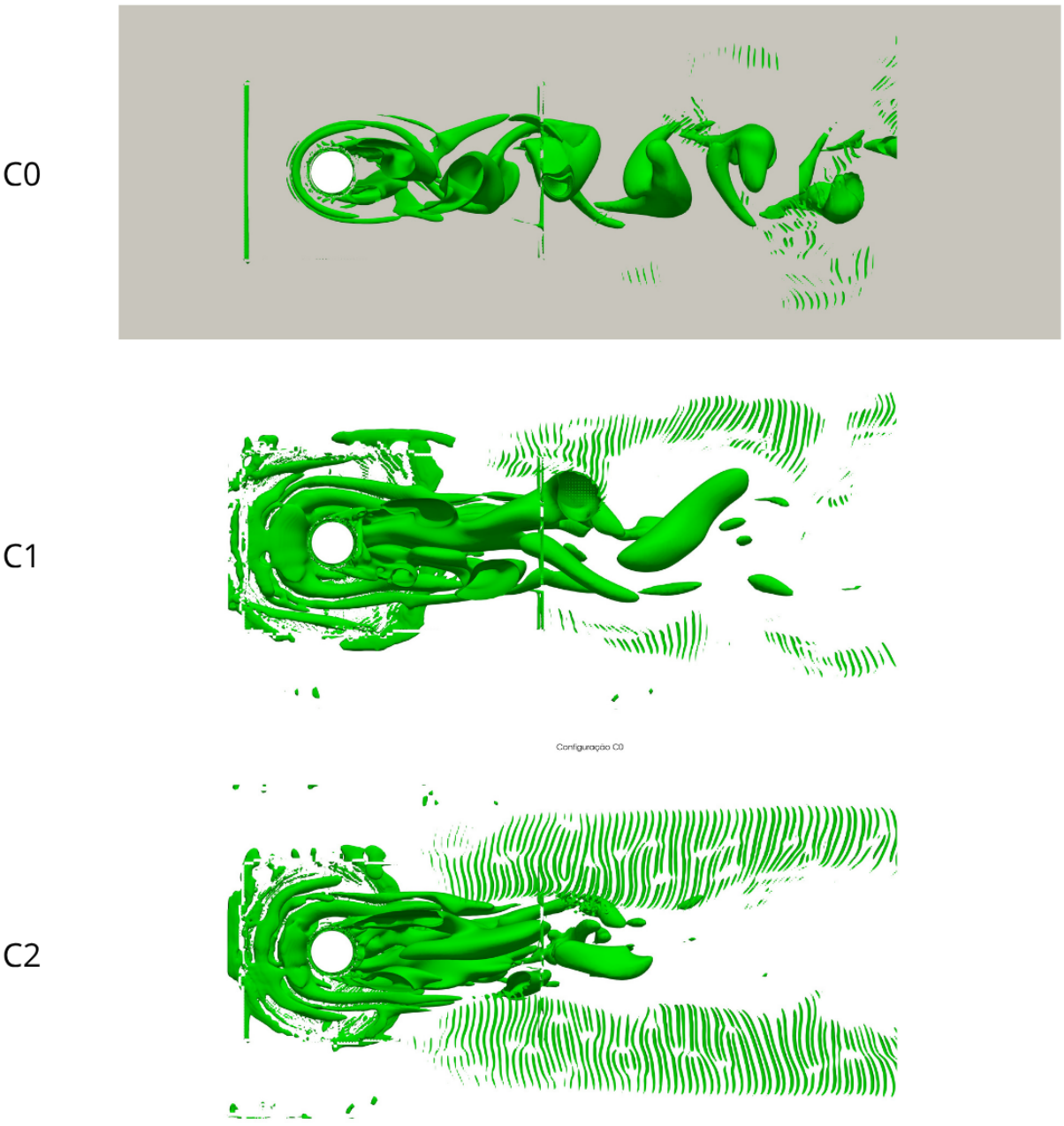


Figura 52 - Vista Superior do Vórtice de Esteira nas 3 Configurações (t = 200 s)

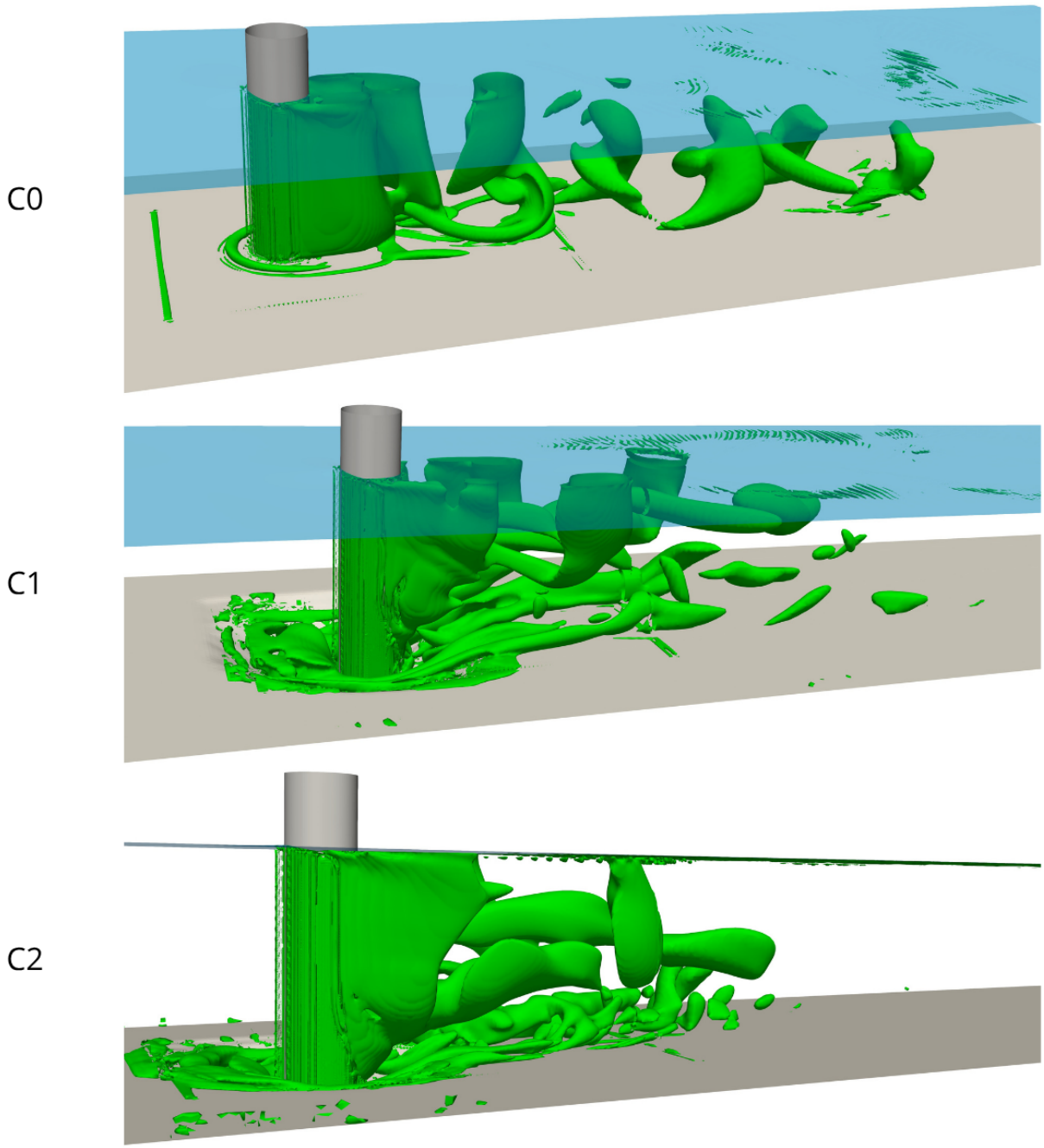


Figura 53 - Vista 3D do Vórtice de Esteira nas 3 Configurações (t = 200 s)

A Figura 54 evidencia a presença do escoamento descendente nas três configurações, verificando-se que, na região imediatamente a montante do pilar, a orientação descendente dos vetores de velocidade demonstra o desvio do escoamento em direção ao leito. Este comportamento resulta da interação entre o escoamento incidente e o obstáculo, conduzindo parte do fluido para

a base do pilar e estabelecendo uma forte interação com o leito. Como consequência, o escoamento descendente alimenta o sistema de vórtices em ferradura, o qual, em conjunto com este fenómeno, desempenha um papel determinante no desenvolvimento da cavidade de erosão, favorecendo a mobilização do material sedimentar na envolvente da base do pilar.

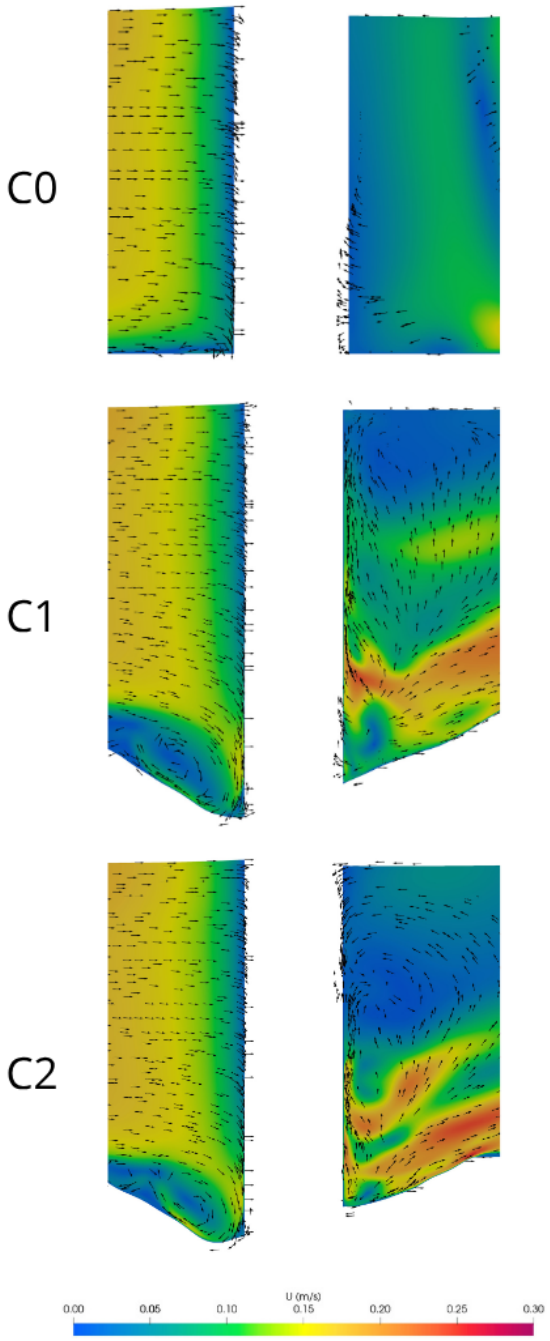


Figura 54 - Visualização do Escoamento Descendente nas 3 Configurações (t = 200 s)

6.2.5 Análise Comparativa

Após a análise individual de cada configuração bem como a identificação dos diferentes fenómenos, procede-se de seguida à comparação entre os diferentes cenários simulados, com o objetivo de avaliar a influência da geometria do leito no comportamento hidrodinâmico do escoamento em torno do pilar. Numa primeira fase, compara-se a configuração C0, com o leito plano, com a configuração C1, com cavidade de erosão com uma camada de areia, analisando o efeito da presença da cavidade. Posteriormente, compara-se a configuração C1 com a configuração C2, de forma a avaliar a influência da geometria da cavidade resultante do processo de erosão.

6.2.5.1 Comparação das Configurações C0 e C1

A comparação entre as configurações C0 e C1 permite avaliar a influência da presença da cavidade de erosão nas principais estruturas desenvolvidas em torno do pilar. Embora os três fenómenos identificados no subcapítulo 6.2.4 estejam presentes em ambas as configurações, verifica-se que a cavidade modifica a sua distribuição e a forma como interagem com o escoamento.

Conforme visível na Figura 51, o sistema de vórtices em ferradura apresenta-se mais desenvolvido e organizado na configuração C1. A presença da cavidade proporciona uma maior área para o desenvolvimento destas estruturas junto à base do pilar, permitindo que os vórtices se prolonguem no interior da cavidade e adquiram uma configuração tridimensional mais evidente. Pelo contrário, na configuração C0, a ausência da cavidade limita o desenvolvimento do sistema vorticoso à proximidade da superfície do leito, originando uma estrutura menos pronunciada.

Relativamente aos vórtices de esteira (Figura 52), observa-se que, na configuração C0, estes apresentam um eixo de desenvolvimento mais marcado na direção transversal ao escoamento, distinguindo-se com maior clareza ao longo da região a jusante do pilar. Na configuração C1, embora os vórtices de esteira se mantenham presentes, é notória a existência de uma estrutura menos contínua, alimentando os fenómenos que aí se desenvolvem.

Por sua vez, a Figura 54 evidencia que o escoamento descendente é mais pronunciado na configuração C1. A orientação descendente dos vetores de velocidade mostra que uma maior quantidade de fluido é conduzida para o interior da cavidade, intensificando a interação entre o escoamento e a base do pilar. Na configuração C0, apesar de este fenómeno também estar presente, o leito plano limita o desenvolvimento vertical do escoamento, reduzindo a sua extensão espacial. Esta diferença explica, igualmente, o desenvolvimento mais expressivo do sistema de vórtices em ferradura observado em C1, uma vez que o escoamento descendente constitui o principal mecanismo responsável pela sua alimentação.

Em conjunto, estas observações demonstram que a presença da cavidade de erosão localizada não origina novas estruturas hidrodinâmicas, mas modifica significativamente a forma como estas se desenvolvem. A cavidade favorece o escoamento descendente e o desenvolvimento do sistema de vórtices em ferradura, concentrando uma maior componente da energia do escoamento na região envolvente da base do pilar. Por outro lado, a configuração de leito plano conduz a uma esteira mais organizada e predominante, evidenciando que a geometria do leito desempenha um papel determinante na redistribuição do escoamento em torno do obstáculo.

As Figuras Figura 55 e Figura 56 apresentam a comparação dos perfis da velocidade longitudinal entre as configurações C0 e C1 para duas cotas distintas do escoamento, permitindo avaliar a influência da cavidade de erosão na distribuição das velocidades e na organização das estruturas hidrodinâmicas em torno do pilar.

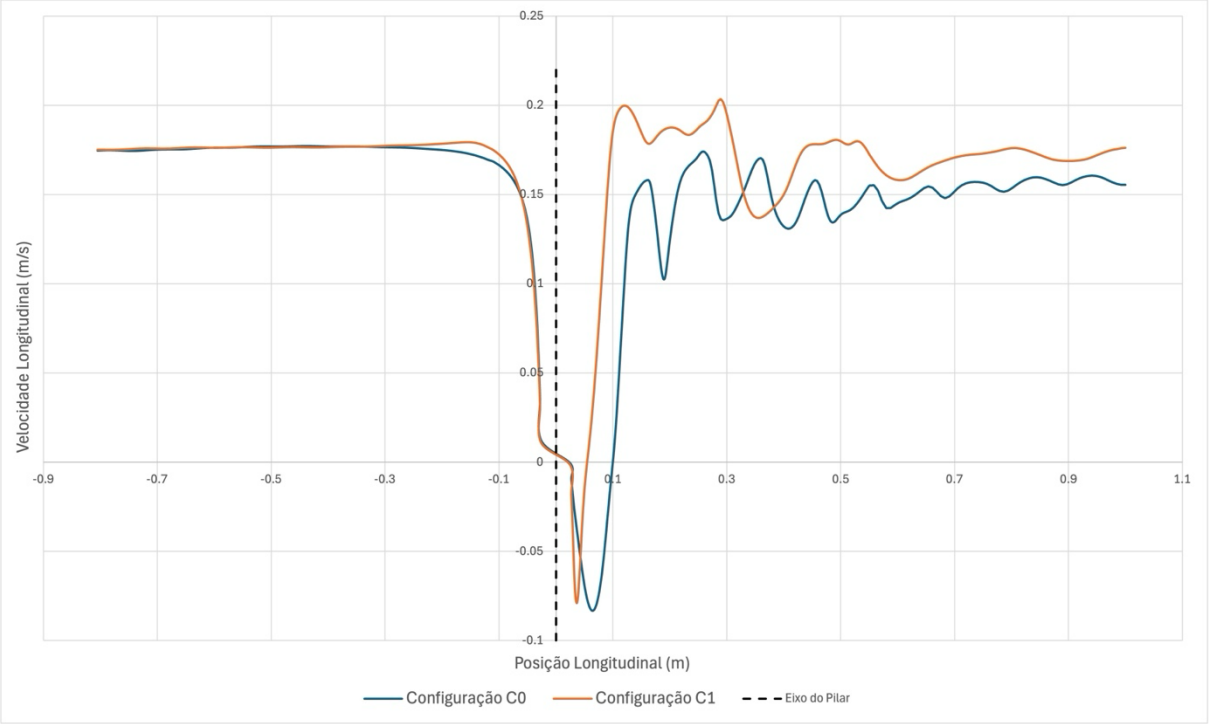


Figura 55 - Perfis Longitudinais da Velocidade U_x para C0 e C1 (z = 0.03 m)

Junto ao leito (Figura 55), as diferenças entre as duas configurações são particularmente evidentes, uma vez que esta região é diretamente condicionada pela geometria da cavidade. A montante do pilar, os perfis permanecem praticamente coincidentes, indicando que a presença da cavidade não altera de forma significativa o escoamento de aproximação. Imediatamente a jusante, ambas as configurações apresentam valores negativos de U_x, associados à inversão local do escoamento e à formação da zona de recirculação da esteira. Contudo, em C0, essa recirculação apresenta maior intensidade e prolonga-se por uma distância superior.

Na configuração C1, o escoamento descendente junto à face de montante conduz parte do fluido para o interior da cavidade, favorecendo o desenvolvimento do sistema de vórtices em ferradura e de zonas de recirculação junto ao leito. Esta redistribuição do escoamento reduz a intensidade da recirculação observada ao longo do eixo longitudinal a jusante do pilar e permite uma recuperação mais rápida da componente U_x. Os valores superiores registados em C1 após a região de recirculação poderão também estar associados ao movimento ascendente do escoamento na zona posterior da cavidade, que volta a alimentar o escoamento principal.

À meia altura do escoamento (Figura 56), observa-se uma tendência semelhante, embora as diferenças entre as configurações não sejam tão influenciadas pelo leito. Os perfis voltam a apresentar um comportamento praticamente coincidente na zona de aproximação, divergindo apenas após a passagem pelo pilar. A configuração C0 apresenta uma velocidade mínima mais negativa e uma recuperação mais gradual, evidenciando uma esteira mais intensa e persistente ao longo do eixo do pilar. Por sua vez, em C1, a inversão da velocidade é menos acentuada e a recuperação ocorre numa distância inferior, mantendo-se posteriormente valores de U_x superiores.

As oscilações observadas nos perfis a jusante estão associadas à sucessão de vórtices na esteira após a passagem pelo pilar. Na configuração C0, a maior amplitude dessas variações sugere uma influência mais marcada dos vórtices de esteira sobre o eixo longitudinal analisado. Em C1, parte da dinâmica do escoamento é transferida para as estruturas tridimensionais existentes no interior e nas proximidades da cavidade, nomeadamente o escoamento descendente e o sistema de vórtices em ferradura, modificando a forma como a esteira se desenvolve.

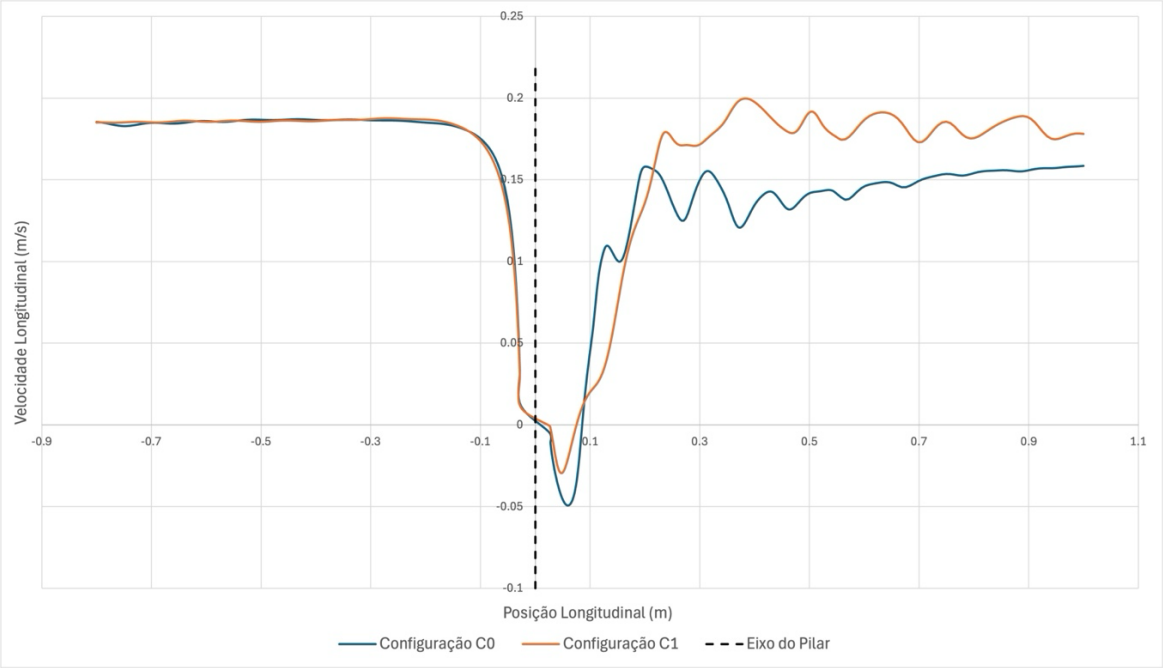


Figura 56 - Perfis Longitudinais da Velocidade U_x para C0 e C1 (z = 0.075 m)

6.2.5.2 Comparação das Configurações C1 e C2

A comparação entre as configurações C1 e C2 permite avaliar a influência da geometria da cavidade de erosão localizada e, indiretamente, das características granulométricas e da disposição das camadas sedimentares, uma vez que estas condicionam a geometria desenvolvida, nas principais estruturas hidrodinâmicas formadas em torno do pilar.

Conforme evidenciado na Figura 51, o sistema de vórtices em ferradura apresenta uma configuração semelhante nas duas cavidades, verificando-se, contudo, que em C1 a estrutura se desenvolve de forma ligeiramente mais extensa e organizada no interior da cavidade. Esta diferença encontra-se relacionada com a geometria da cavidade, uma vez que, na configuração C1, o leito era constituído exclusivamente por areia fina, material mais facilmente mobilizável pela ação do escoamento. Como consequência, desenvolveu-se uma cavidade de maiores dimensões, proporcionando um volume mais amplo para a circulação do fluido e para o desenvolvimento das estruturas turbulentas junto à base do pilar. Apesar disso, as diferenças observadas são moderadas, indicando que a alteração da geometria da cavidade influencia sobretudo a estrutura do vórtice, sem modificar o mecanismo responsável pela sua formação.

Relativamente aos vórtices de esteira (Figura 52), não se identificam diferenças significativas entre as duas configurações. Em ambos os casos observa-se o desprendimento de estruturas vorticosas a jusante do pilar, evidenciando que a alteração da geometria da cavidade não modifica de forma substancial a formação da esteira. As pequenas diferenças verificadas na distribuição espacial destas estruturas parecem estar associadas à distinta interação entre a esteira e o escoamento que circula no interior da cavidade. No entanto, importa salientar que a comparação corresponde a um único instante da simulação, podendo as configurações encontrar-se em fases distintas do processo de desprendimento de vórtices. Assim, estas diferenças devem ser interpretadas com prudência, não sendo possível retirar conclusões definitivas apenas com base na comparação de um único instante.

No que respeita ao escoamento descendente (Figura 54), este mantém-se claramente identificável nas duas configurações, sendo evidenciado pela orientação descendente dos vetores de velocidade na região imediatamente a montante do pilar. Em C2, este fenómeno aparenta apresentar uma maior extensão espacial, conduzindo uma fração ligeiramente superior do escoamento para o interior da cavidade. Consequentemente, observa-se uma interação mais prolon-

gada entre o escoamento descendente e o sistema de vórtices em ferradura, embora esta diferença seja relativamente discreta.

De um modo geral, os resultados mostram que a alteração da geometria da cavidade exerce uma influência menos expressiva do que a própria presença da cavidade. Enquanto a comparação entre C0 e C1 evidencia uma reorganização significativa do escoamento em torno da base do pilar, as diferenças entre C1 e C2 manifestam-se sobretudo na extensão e organização das estruturas hidrodinâmicas, mantendo-se, em ambos os casos, os mesmos mecanismos físicos responsáveis pelo desenvolvimento da erosão localizada.

Com o objetivo de complementar a análise visual das estruturas do escoamento, apresentam-se nas Figuras Figura 57 e Figura 58 os perfis longitudinais da componente da velocidade na direção principal do escoamento, obtidos, respetivamente, às cotas z = 0.03 m e z = 0.075 m, respetivamente.

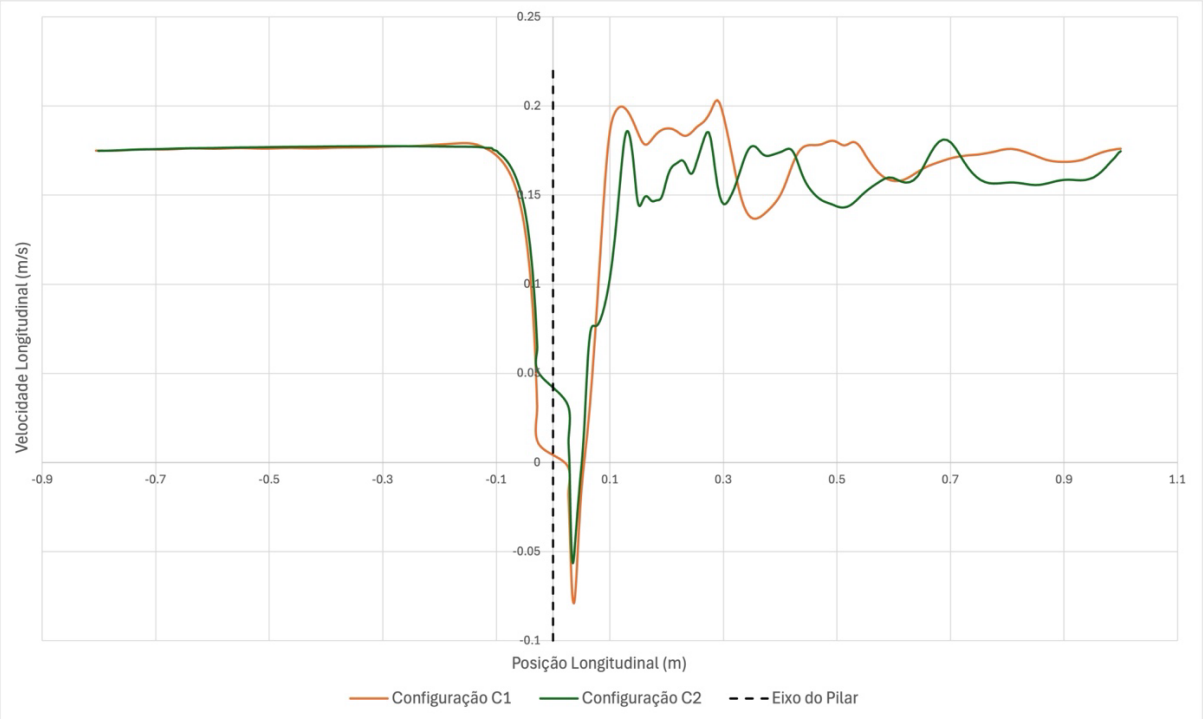


Figura 57 - Perfis Longitudinais da Velocidade U_x para C1 e C2 (z = 0.03 m)

À cota z = 0.03 m (Figura 57), os perfis apresentam um comportamento semelhante na aproximação ao pilar. Na região correspondente ao pilar, a configuração C2 apresenta valores de U_x

sistematicamente superiores aos de C1, diferença que deixa de ser evidente mais a jusante, onde ambos os perfis tendem novamente para valores semelhantes.

Após esta região, os dois perfis apresentam oscilações associadas à passagem dos vórtices de esteira, contudo, não se observa uma tendência de velocidades superiores numa das configurações ao longo de toda a região a jusante, uma vez que as curvas se aproximam e intersetam em diferentes posições. A configuração C2 apresenta algumas variações mais irregulares, o que poderá refletir diferenças na interação entre o escoamento descendente, o sistema de vórtices em ferradura e a geometria específica da cavidade. Ainda assim, apenas com base neste perfil não é possível afirmar que essas estruturas sejam globalmente mais intensas em C2.

A meia altura do escoamento (Figura 58), os perfis voltam a ser praticamente coincidentes a montante do pilar. Imediatamente a jusante, C1 apresenta uma inversão mais evidente da velocidade, enquanto em C2 os valores se mantêm próximos de zero. A recuperação do escoamento é mais rápida em C1, que atinge velocidades superiores durante grande parte do troço analisado. Em C2, a velocidade aumenta de forma mais gradual, embora a diferença entre as duas configurações diminua progressivamente a jusante.

As oscilações observadas após a recuperação estão relacionadas com a presença dos vórtices de esteira. Em ambas as configurações, estas oscilações apresentam amplitudes moderadas e tendem a diminuir com a distância ao pilar. Embora C1 apresente geralmente valores de U_x superiores nesta cota, os perfis aproximam-se na parte final do domínio, indicando que a influência da geometria da cavidade diminui à medida que o escoamento se afasta do pilar, conforme seria expectável.

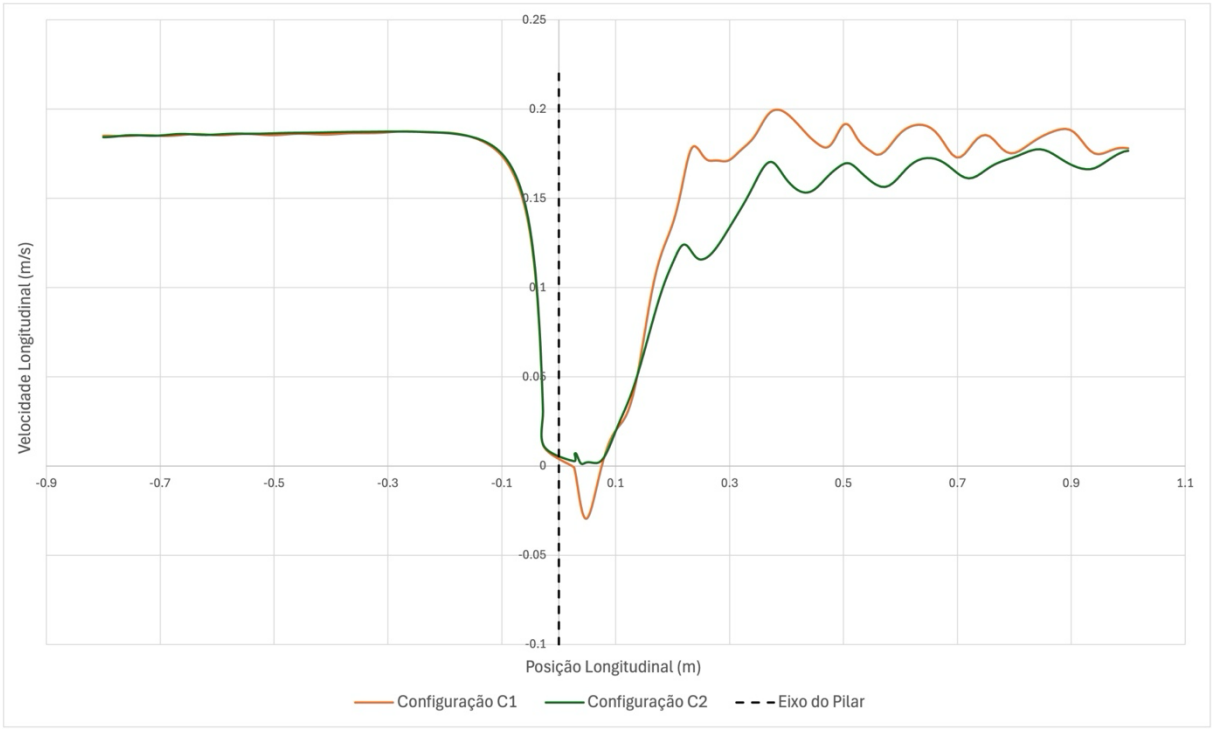


Figura 58 - Perfis Longitudinais da Velocidade U_x para C1 e C2 (z = 0.075 m)

No conjunto, os resultados mostram que as diferenças entre C1 e C2 são menos pronunciadas do que as observadas entre C0 e C1. A alteração da geometria da cavidade influencia sobretudo a intensidade da inversão da velocidade, originando as zonas de recirculação, e a forma como o escoamento recupera imediatamente a jusante do pilar. Contudo, não se identifica, com base nestes perfis, uma modificação substancial do comportamento global do escoamento, o que sugere que a presença da cavidade tem uma influência mais significativa do que as diferenças geométricas existentes entre as duas cavidades analisadas.

6.2.5.3 Análise e Comparação dos Parâmetros do Escoamento

De modo a complementar a análise dos fenómenos do escoamento, procedeu-se à análise das três configurações através da comparação do coeficiente C_D, da frequência de desprendimento dos vórtices e do número de *Strouhal* (Tabela 13). Conforme mencionado anteriormente, para esta análise considerou-se apenas a malha de cada configuração com a maior resolução por corresponder à solução com maior precisão nos resultados.

Tabela 13 - Parâmetros avaliados nas Simulações 3D

Configuração	N.º de Células	C_D médio	Frequência (Hz)	N.º de *Strouhal*
C0	5 413 098	1.10	0.77	0.21
C1	5 642 240	0.79	0.71	0.20
C2	5 543 548	0.86	0.96	0.27

O cálculo do C_D e do C_L nas simulações 3D revelou, nas configurações com erosão, uma dificuldade adicional decorrente da geometria irregular da cavidade de erosão. O cálculo da força a partir da integração direta da pressão total sobre a superfície do pilar revelou, nas configurações C1 e C2, um desequilíbrio na componente horizontal da força, devido à assimetria da cavidade de erosão relativamente ao eixo do pilar, impedindo assim o cancelamento da componente hidrostática da pressão nessa região. Para isolar a componente dinâmica da força, responsável pelo arrastamento e pela sustentação, subtraiu-se à pressão total uma pressão hidrostática de referência, admitindo uma superfície livre horizontal em torno do pilar, tratando-se de uma aproximação. Os valores de C_D apresentados na Tabela 13 resultam desta correção e do valor da pressão média nos últimos 10 s das simulações.

A razão pela qual as configurações com erosão apresentam coeficientes de arrastamento inferiores aos da configuração C0, deve-se ao facto de a força de arrasto ter magnitude semelhante, no entanto, a maior área projetada do pilar exposto reduz o valor do coeficiente.

Relativamente ao coeficiente de sustentação, não se considerou adequada a sua apresentação, uma vez que o cálculo efetuado baseou-se na pressão média ao longo dos últimos 10 s de simulação. Atendendo ao caráter alternado da força lateral associada ao desprendimento periódico de vórtices, a média temporal tende a conduzir a valores próximos de zero, não permitindo caracterizar corretamente a amplitude das oscilações. A determinação de C_L deveria, por isso, basear-se nos valores máximos ou na amplitude da força lateral ao longo do tempo.

A análise dos parâmetros apresentados na Tabela 13 evidencia também a variação da frequência de desprendimento dos vórtices entre as diferentes configurações. A configuração C1 apresenta o valor mais reduzido (0.71 Hz) muito próximo do valor de frequência teórico (0.72 Hz), enquanto a configuração C0 apresenta um valor ligeiramente superior, com 0.77 Hz. Por sua vez, a configuração C2 apresenta o valor mais elevado (0.96 Hz), sugerindo que a alteração da geometria da cavidade influencia a periodicidade do desprendimento dos vórtices na esteira.

Relativamente ao número de *Strouhal*, verifica-se uma boa concordância com o valor teórico de referência para o ensaio experimental (St = 0.2) para as configurações C0 (0.21) e C1 (0.20), sendo que o valor de C1 diverge muito pouco do valor teórico considerado. Já a configuração C2 apresenta um número de *Strouhal* de 0.27, um valor superior ao teórico, refletindo uma frequência de desprendimento mais elevada.

Comparando estes resultados com aqueles obtidos nas simulações 2D, presentes na Tabela 12, verifica-se que as frequências obtidas para as configurações C0 e C1 são inferiores às determinadas no modelo bidimensional (0.90 Hz), enquanto a configuração C2 apresenta um valor ligeiramente superior. De igual modo, os números de *Strouhal* de C0 e C1 aproximam-se mais do valor teórico do que o obtido nas simulações 2D, com a configuração C2 a apresentar um valor ligeiramente superior. Importa, no entanto, salientar que esta comparação é condicionada pelas diferenças existentes entre as abordagens consideradas para as simulações bidimensionais e tridimensionais. Enquanto a modelação tridimensional considera explicitamente o escoamento bifásico água-ar através do modelo *interFoam* e é capaz de reproduzir de forma fidedigna as estruturas turbulentas presentes no escoamento, incluindo a componente vertical da velocidade, o modelo bidimensional constitui uma simplificação do problema, não sendo capaz de representar na íntegra os principais mecanismos hidrodinâmicos que se desenvolvem em torno do pilar.

7
CONCLUSÕES

7.1 CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como principal objetivo analisar o escoamento em torno de um pilar considerando três configurações de fundo fixo: uma situação de leito plano, representativa da fase anterior ao desenvolvimento da cavidade de erosão; uma cavidade formada em areia fina; e uma cavidade desenvolvida numa camada superior de areia grossa e uma camada inferior de areia fina. O estudo centrou-se, sobretudo, na avaliação da influência exercida pelas diferentes geometrias da cavidade de erosão localizada sobre o escoamento na envolvente do pilar. Para esse efeito, recorreu-se à modelação *CFD* em ambiente *OpenFOAM*, através do desenvolvimento de simulações bidimensionais e tridimensionais, que permitiram analisar os campos de velocidade, as principais estruturas características do escoamento e alguns parâmetros associados ao desprendimento de vórtices.

A construção do modelo numérico teve como base um ensaio experimental, no qual foram obtidas nuvens de pontos representativas das configurações do leito após o desenvolvimento das cavidades de erosão. Contudo, estas não abrangiam toda a região necessária à definição das geometrias e alguns parâmetros experimentais encontravam-se indisponíveis. Por esse motivo, foi necessário tomar decisões de simplificação a nível geométrico, procurando compatibilizar a informação existente com as exigências do modelo e preservar as características essenciais de cada configuração.

As simulações bidimensionais constituíram uma etapa inicial de aprendizagem e consolidação dos procedimentos de modelação numérica, permitindo adquirir experiência na preparação dos casos, geração das malhas, execução das simulações e tratamento dos resultados. Paralela-

mente, possibilitaram a confirmação da reprodução dos principais fenómenos do escoamento em torno do pilar, servindo como validação para o posterior desenvolvimento das simulações tridimensionais.

As simulações tridimensionais constituíram a principal componente do estudo. Para cada uma das três configurações foram analisadas seis resoluções de malha, num total de 18 simulações. A metodologia adotada permitiu, na malha de maior resolução, identificar claramente os principais fenómenos do escoamento em torno do pilar, designadamente o vórtice em ferradura, os vórtices de esteira e o escoamento descendente. A forma como estas estruturas se desenvolveram nas diferentes configurações mostrou-se fisicamente coerente, reforçando a adequação do modelo numérico à representação do escoamento analisado.

A comparação entre C0 e C1 evidenciou que a presença da cavidade de erosão altera de forma significativa o escoamento na proximidade do pilar, promovendo o desenvolvimento do sistema de vórtices em ferradura no interior da cavidade e modificando a distribuição dos campos de velocidade a jusante do pilar.

Na configuração de leito plano (C0), o escoamento apresentou uma esteira mais persistente e organizada, embora permanecessem evidentes a zona de estagnação a montante e a esteira formada após o pilar. Por sua vez, a comparação entre C1 e C2 evidenciou que a geometria da cavidade, condicionada pelas diferentes características granulométricas dos materiais do leito, influencia a organização do escoamento. A maior profundidade da cavidade em C1 favoreceu um desenvolvimento ligeiramente mais extenso e organizado do sistema de vórtices em ferradura, não se tendo identificado diferenças significativas na esteira entre as duas configurações.

Relativamente aos coeficientes de força, verificou-se que o cálculo direto a partir da pressão total nas configurações com erosão era afetado pela assimetria da cavidade em torno do pilar, impedindo o cancelamento da componente hidrostática da pressão. Após isolar a componente dinâmica, obtiveram-se valores de C_D fisicamente coerentes para as três configurações, com C1 e C2 a apresentarem coeficientes inferiores ao de C0, devido à maior área projetada do pilar exposta pela erosão. Este resultado confirma que o aumento da área frontal do pilar, e não um aumento proporcional da força de arrastamento, é o fator determinante na redução do C_D nas configurações erodidas.

7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Embora os resultados obtidos tenham permitido caracterizar e identificar os principais fenómenos do escoamento em torno do pilar, bem como analisar a influência das diferentes geometrias do leito, o estudo apresenta algumas limitações, constituindo assim possibilidades de investigação futura.

A principal limitação incide nas simplificações adotadas na representação das cavidades de erosão localizada. Embora baseadas em levantamentos experimentais, as geometrias tiveram de ser processadas, reconstruídas e ajustadas, uma vez que as nuvens de pontos não abrangiam toda a área necessária à definição completa do fundo no domínio numérico. Por esse motivo, não foi considerada a região situada a jusante da cavidade, o que limita a análise da evolução do escoamento após a zona erodida e da sua recuperação ao longo do canal.

Outra limitação prende-se com o número reduzido de configurações analisadas e com a quantidade de dados experimentais disponíveis para validação dos resultados. O perfil de velocidades a montante foi utilizado como condição de entrada do modelo numérico, não constituindo, por isso, um elemento de comparação. A ausência de medições no interior do escoamento, sobretudo na proximidade do pilar e da cavidade, impossibilitou uma validação detalhada dos campos de velocidade.

Em trabalhos futuros, seria relevante implementar um modelo morfodinâmico que permitisse a reprodução simultânea do escoamento, do transporte de sedimentos e da evolução da cavidade de erosão. A análise poderia também ser alargada a outras combinações granulométricas, com diferentes espessuras das camadas sedimentares e condições hidráulicas distintas.

Seria também relevante efetuar uma análise das tensões de arrastamento junto ao fundo e compará-las com as tensões críticas de mobilização dos materiais das duas camadas, permitindo identificar as zonas com maior potencial de erosão e compreender melhor a influência das diferentes características granulométricas na evolução da cavidade.

Apesar de o modelo *k-ω SST* ter permitido identificar de forma clara as principais estruturas turbulentas do escoamento, a utilização de modelos de turbulência mais avançados, como *LES* ou abordagens híbridas *RANS-LES*, poderia proporcionar uma representação mais detalhada da

dinâmica dos vórtices em ferradura e de esteira, bem como das respetivas flutuações ao longo do tempo.

Por fim, sugere-se a realização de ensaios experimentais com a utilização de equipamento que seja capaz de efetuar medições de velocidade, turbulência e tensões junto ao fundo em vários pontos, contribuiria para uma validação mais completa do modelo numérico e para uma interpretação mais robusta dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrunhosa, J. D. M. (2003). *Simulação de Escoamento Turbulento Complexo com Modelagem Clássica e de Grandes Escalas* [Tese de Doutoramento]. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. McGraw-Hill.

Azevedo, M. A. C. da S. (2011). *Estudos preliminares sobre ejecção de vórtices em torno de um cilindro no regime turbulento com separação laminar* [Tese de Mestrado, Universidade do Porto; Application/pdf]. https://doi.org/10.34626/QM6V-6H49

Blazek, J. (2001). *Computational fluid dynamics: Principles and applications* (1st ed). Elsevier.

Bono, G., Lyra, P. R. M., & Bono, G. F. F. (2011). Solução numérica de escoamentos incompressíveis com Simulação de Grandes Escalas. *Mecánica Computacional*, *30*, 1423–1440.

Bortoli, Á. L. D. (2000). *Introdução à dinâmica de fluidos computational*. Ed. Universidade/UFRGS.

Castiblanco, M. E. M. (2016). *Experimental Study of Local Scour Around Complex Bridge Piers*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Chambel, J. R. de S. (2019). *Analysis of Long-Term Damage of Offshore Wind Turbine Foundations* [Universidade do Porto; Application/pdf]. https://doi.org/10.34626/WSF9-8F04

Chaves, A. M. M. (2024). *Scour at Offshore Wind Structures in Complex Soils* [Universidade do Porto; Application/pdf]. https://doi.org/10.34626/H8EX-XQ51

Couto, L. T., & Cardoso, A. H. (2001). *Erosões Localizadas junto de Encontros e Pilares de Pontes. Parte I - Caracterização da Situação de Referência*. *22*(1), 65–74.

DeVos, L. (2008). *Optimisation of scour protection design for monopiles and quantification of waver run-up*. Ghent University.

Ettema, R., Constantinescu, G., & Melville, B. W. (2017). Flow-Field Complexity and Design Estimation of Pier-Scour Depth: Sixty Years since Laursen and Toch. *Journal of Hydraulic Engineering*, *143*(9), 03117006. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001330

Fael, C. M. (2007). *Erosões Localizadas junto de Encontros de Pontes e Respetivas Medidas de Proteção.* [Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil]. Universidade da Beira Interior.

Ferziger, J. H., Perić, M., & Street, R. L. (2020). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99693-6

Gilletta, A., Bonamy, C., Robert, M., & Chauchat, J. (2025). Assessment of hybrid RANS/LES models for the prediction of the flow and scour around a wall-mounted cylinder. *Advances in Water Resources*, *199*, 104934. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2025.104934

Gonçalves, N. D. F. (2007). *Método dos Volumes Finitos em Malhas Não Estruturadas* [Universidade do Porto; Application/pdf]. https://doi.org/10.34626/N5QX-5A48

Harris, J. M., Whitehouse, R. J. S., & Benson, T. (2010). The time evolution of scour around offshore structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, *163*(1), 3–17. https://doi.org/10.1680/maen.2010.163.1.3

Helmi, A. M., & Shehata, A. H. (2021). Three-Dimensional Numerical Investigations of the Flow Pattern and Evolution of the Horseshoe Vortex at a Circular Pier during the Development of a Scour Hole. *Applied Sciences*, *11*(15), 6898. https://doi.org/10.3390/app11156898

Hoffmans, G. J. C. M., & Verheij, H. J. (Eds.). (2021). *Scour Manual: Current-Related Erosion* (2.ª ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b22624

Kalidindi, M. K., & Khosa, R. (2024). Evolution of coherent structures in the flow around a circular pier with a developing scour hole: A numerical study. *Physics of Fluids*, *36*(2), 025119. https://doi.org/10.1063/5.0187905

Keylock, C. J., Constantinescu, G., & Hardy, R. J. (2012). The application of computational fluid dynamics to natural river channels: Eddy resolving versus mean flow approaches. *Geomorphology*, *179*, 1–20. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.006

Kolmogorov, A. N. (1942). Equations of turbulence motion of an incompressible fluid. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Seriya Fizicheskaya*, *6*.

Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *3*(2), 269–289. https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2

Martinez, D. M. V. (2006). *Transição à Turbulência na Camada de Mistura Estavelmente Estratificada utilizando Simulação Numérica Direta e Simulação de Grandes Escalas* [Tese de Doutoramento]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

Md Nazmus Sakib. (2013). *CFD Techniques for Simulation of Flow in a Scour Hole around a Bridge Pier* [Thesis]. Concordia University.

Melville, B. W., & Raudkivi, A. J. (1977). FLOW CHARACTERISTICS IN LOCAL SCOUR AT BRIDGE PIERS. *Journal of Hydraulic Research*, *15*(4), 373–380. https://doi.org/10.1080/00221687709499641

Menter, F. R. (1992). *Improved Two-Equation k-omega Turbulence Models for Aerodynamic Flows* (TM-103975; pp. 1–18). NASA.

Nielsen, A. W., Mutlu Sumer, B., Fredsøe, J., & Christensen, E. D. (2011). Sinking of armour layer around a cylinder exposed to a current. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, *164*(4), 159–172. https://doi.org/10.1680/maen.2011.164.4.159

Petersen, T. U., Mutlu Sumer, B., Fredsøe, J., Raaijmakers, T. C., & Schouten, J.-J. (2015). Edge scour at scour protections around piles in the marine environment—Laboratory and field investigation. *Coastal Engineering*, *106*, 42–72. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.08.007

Pinheiro, R. M. C. (2010). *Estudo experimental da erosão em pilares de pontes* [Universidade do Porto; Application/pdf]. https://doi.org/10.34626/C0XR-JJ43

Pinto, L. C. (2008). *Análise por Simulação Numérica do Desprendimento de Vórtice de um Cilindro Circular em Movimento Forçado* [Dissertação de Pós-Graduação]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Piomelli, U. (2004). Large-eddy and direct simulation of turbulent flows. Em *Introduction to Turbulence Modeling*. von Karman Institute for Fluid Dynamics.

Ramos, P. (2012). *Modelação numérica do escoamento em torno de um pilar* [Universidade do Porto; Application/pdf]. https://doi.org/10.34626/8QQX-E558

Ramos, P., Joao Pedro Pego, & Maia, R. (2014). *Numerical simulation of the flow around a pier using OpenFOAM*. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3873.8648

Roshko, A. (1954). *On the Drag and Shedding Frequency of Two-Dimensional Bluff Bodies* (NACA Technical Note 3169). California Institute of Technology.

Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., & Michelsen, J. (2005). Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid Mechanics*, *534*, 351–401. https://doi.org/10.1017/S0022112005004507

Saffman, P. G. (1970). A model for inhomogeneous turbulent flow. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, *317*(1530), 417–433. https://doi.org/10.1098/rspa.1970.0125

Saffman, P. G., & Wilcox, D. C. (1974). Turbulence-Model Predictions for Turbulent Boundary Layers. *AIAA Journal*, *12*(4), 541–546. https://doi.org/10.2514/3.49282

Sassetti Mendes, L. (2021). *Computational Fluid Dynamics Modelling of Flows in Spillways Chutes* [Tese de Doutoramento]. Universidad de Cantabria.

Shields, A. (1936). *Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement*.

Silva, R. C. A. F. da. (2010). *Avaliação experimental e numérica de parâmetros associados a modelos de evolução da linha de costa* [Universidade do Porto; Application/pdf]. https://doi.org/10.34626/DR9H-DH57

Smagorinsky, J. (1963). General Circulation Experiments with the Primitive Equations: I. The Basic Experiment. *Monthly Weather Review*, *91*(3), 99–164. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2

Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands: A manual for practical applications*. London : Telford. https://searchworks.stanford.edu/view/4489235

Sumer, B. M., & Fredsøe, J. (1997). *Hydrodynamics around cylindrical structures*. World Scientific.

Sumer, B. M., Petersen, T. U., Locatelli, L., Fredsøe, J., Musumeci, R. E., & Foti, E. (2013). Backfilling of a Scour Hole around a Pile in Waves and Current. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, *139*(1), 9–23. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000161

Unger, J., & Hager, W. H. (2007). Down-flow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers. *Experiments in Fluids*, *42*, 1–19.

Unglehrt, L., Jenssen, U., Kurz, F., Schanderl, W., Kreuzinger, J., Schwertfirm, F., & Manhart, M. (2022). Large–Eddy Simulation of the Flow Inside a Scour Hole Around a Circular Cylinder Using a Cut Cell Immersed Boundary Method. *Flow, Turbulence and Combustion*, *109*(4), 893–929. https://doi.org/10.1007/s10494-022-00379-x

Wendt, J. F. (Ed.). (2009). *Computational Fluid Dynamics*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85056-4

Whitehouse, R. (1998). *Scour at Marine Structures: A Manual for Practical Applications*. Thomas Telford Ltd. https://doi.org/10.1680/sams.26551

Williamson, C. H. K. (1996). Vortex Dynamics in the Cylinder Wake. *Annual Review of Fluid Mechanics*, *28*, 477–539.

Zefzouf, M., Chioukh, N., Castro, M., Miranda, F., Leal Sousa, R., Carvalho, E., Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., & Fazeres-Ferradosa, T. (2025). Laboratory study on scour development around a monopile in layered soils. *Ocean Engineering*, *342*, 122968. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122968