

MODELAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO EM TORNO DE UM PILAR

PEDRO XAVIER CUNHA RAMOS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor João Pedro Gomes Moreira Pêgo

Co-Orientador: Professor Doutor Rodrigo Jorge Oliveira Maia

JUNHO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@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

Fax +351-22-508 1440

✉ 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 Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.*

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

“A simplicidade é a sofisticação máxima.”

Leonardo Da Vinci

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, o Professor João Pedro Pêgo, não só agradeço a disponibilidade e os valiosos pareceres, como também a postura profissional que manteve e os incentivos que me reservou. O seu empenho e o seu método de trabalho só contribuíram para que eu melhorasse, de modo a corresponder ao seu nível. Agradeço também a leitura atenta e a crítica minuciosa das versões preliminares desta dissertação. Por tudo isto e pelas oportunidades que me proporcionou, um muito obrigado.

Ao Professor Rodrigo Maia, co-orientador desta dissertação, devo o conhecimento adquirido nas agradáveis reuniões que tivemos, que tanto valorizaram este trabalho.

Agradeço ao Luís Brito, pelos seus conselhos e pela preciosa informação que me facultou. Sinto-me mais grato ainda pelo seu trabalho na preparação do ensaio laboratorial, realizado no âmbito desta dissertação.

Ao João Oliveira agradeço a atenção que dedicou à leitura desta tese – não deixou passar incólumes eventuais lapsos, nos quais eu não teria reparado.

Os meus sinceros agradecimentos à Andreia Moreira, ao Agostinho Rocha e ao João Sousa, pelos seus preciosos contributos na reta final deste trabalho.

Pela amizade e pelo apoio incondicionais, o meu profundo agradecimento aos meus amigos.

Um agradecimento especial à minha família, por tudo aquilo que são para mim e porque, sem eles, eu nada teria conseguido.

RESUMO

A presença de um obstáculo no seio de um escoamento propicia a ocorrência de fenómenos erosivos, cujos métodos de previsão são ainda demasiados empíricos, baseados em experiências executadas no ambiente controlado de um laboratório.

Nesta dissertação, foi dado valor não só ao conhecimento que pode extrair-se de experiências laboratoriais, como de igual modo às vantagens que o avanço das novas tecnologias proporciona, através da modelação numérica.

Numa primeira fase, foi simulado numericamente o escoamento em torno de um pilar circular (50 mm de diâmetro), num fundo plano, correspondendo ao início do processo erosivo. Com isto, obtiveram-se valores do campo de velocidades, pressões, tensões de arrastamento e força de arrasto no pilar, de modo a melhor caraterizar o fenómeno erosivo que ocorre devido à perturbação induzida pela presença do pilar. Neste processo, foram testados dois modelos de turbulência distintos: o LES e o SST $k-\omega$, resultando assim num total de duas simulações numéricas que possibilitaram a comparação entre os dois modelos utilizados.

Posteriormente, elaborou-se um ensaio laboratorial de um escoamento em torno do pilar, fundado num leito arenoso, de modo a poder caraterizar a geometria da cavidade de erosão que se forma em torno do dito obstáculo.

Após a atividade experimental, efetuou-se a modelação numérica do escoamento com uma configuração correspondente à geometria de fundo correspondente à profundidade de equilíbrio medida em laboratório, onde foram empregues os modelos de turbulência acima mencionados. Esta simulação permitiu identificar as diferenças no escoamento entre a situação de início e final do processo. Pretendeu-se, assim, identificar os principais mecanismos que dão início ao processo erosivo junto de pilares.

Com o intuito de alargar os objetivos iniciais da dissertação, foi realizada uma última simulação numérica do escoamento em torno de um pilar, também ele em fundo plano, com a diferença do diâmetro ser o dobro do utilizado anteriormente.

O conjunto de simulações permitiu caraterizar numericamente os fenómenos descritos pela bibliografia e testar a eficiência dos modelos de turbulência utilizados, evidenciando, assim, parte do contributo que a área da modelação numérica pode oferecer ao estudo da erosão em pilares. Assim, foi demonstrado que o modelo LES conduz a melhores resultados comparativamente ao SST $k-\omega$, apesar de exigir maior tempo de processamento. A dificuldade do *software* em simular o escoamento aumenta com a complexidade da geometria.

PALAVRAS-CHAVE: erosão localizada, modelação numérica de escoamentos, turbulência, atividade experimental, *Fluent*.

ABSTRACT

The presence of an obstacle in a flow facilitates the occurrence of the scour phenomenon, whose prevision methods are still too empirical, based on experiments performed in the controlled environment of a laboratory.

In this dissertation, value was given not only to the knowledge that can be deduced from experiments on the laboratory, but also, and in the same amount, to the advantages of the technological evolution, through numerical simulation.

Firstly, it was simulated a flow around a pier (with 50 mm of diameter) in a flat bottom, which corresponded to the beginning of the scour process. With this, some values were obtained (e.g. field speeds, pressures, shear stresses and drag force on the pier) in order to reach a better characterization of the scour phenomenon occurring due to the disturbance induced by the pier. In this process, two different turbulence models have been tested: the LES and the SST $k-\omega$, resulting in a total of two numerical simulations that allowed the comparison between the two used models used.

Subsequently was developed one laboratorial test of a flow around a pier, founded on a sand bed, in order to characterize the geometry of the cavity created by the scour around the pier.

After the experimental activity, the numerical simulation of the flow was performed with the background geometry configuration corresponding to the measured depth of balance, where the above mentioned models were used. This simulation enabled the definition of the differences between the beginning and the final flow of the process. With this, it was defined the goal of identifying the main mechanism which initiates the scour near the pier.

Intending to widen the starting goals of the dissertation, one last numerical simulation was made, of the draining around a pillar, itself also in a flat background, with the single difference that the diameter was twice that used beforehand.

This set of simulations allowed numerical characterization of the phenomena described by the bibliography, and testing of the efficiency of the models of turbulence used, thus showing part of the contribution that the area of numerical simulation may bring to the study of pier erosion. LES model leads to better results comparatively to SST $k-\omega$, although it requires greater processing time. The difficulty of the software to execute the flow simulation increases with the complexity of the geometry.

KEYWORDS: scour, computational fluid dynamics, turbulence, laboratory activities, *Fluent*.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. APRESENTAÇÃO E ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. MOTIVAÇÃO.....	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. ESCOAMENTOS EM TORNO DE PILARES. EROSÃO EM PILARES.	5
2.1. CARATERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO EM TORNO DE UM PILAR.....	5
2.2. FORÇAS HIDRODINÂMICAS ATUANTES NO PILAR.....	11
2.3. VELOCIDADE CRÍTICA DE ARRASTAMENTO	12
2.4. TENSÕES NO FUNDO	13
2.5. CAVIDADE DE EROSÃO	13
3. ENSAIO LABORATORIAL	15
3.1. CARATERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO	15
3.2. CARATERIZAÇÃO DAS INSTALAÇÕES	15
3.3. PREPARAÇÃO DO ENSAIO	18
3.4. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	19
3.5. MATERIAL DO FUNDO	21
3.6. TRATAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	22
3.6.1. PROFUNDIDADE DE EQUILÍBRIO	22
3.6.2. CARATERIZAÇÃO DA GEOMETRIA DA CAVIDADE DE EROSÃO	22
3.7. FENÓMENOS OBSERVADOS NO ESCOAMENTO.....	25
4. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS	Erro! Marcador não definido.
4.1. INTRODUÇÃO À MODELAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS	27
4.2. EQUAÇÕES GOVERNATIVAS	28
4.2.1. CONSERVAÇÃO DA MASSA	28
4.2.2. EQUAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO.....	29

4.3. ESCOAMENTOS TURBULENTOS	29
4.3.1. VARIÁVEIS CARACTERÍSTICAS DA TURBULÊNCIA	31
4.3.1.1. Intensidade da turbulência.....	31
4.3.1.2. Comprimento característico de turbulência	31
4.3.1.3. Energia cinética turbulenta.....	31
4.3.1.4. Taxa de dissipação turbulenta.....	31
4.3.1.5. Taxa de dissipação específica.....	31
4.3.1.6. Viscosidade cinemática turbulenta.....	31
4.4. MODELOS DE RESOLUÇÃO NUMÉRICA.....	33
4.4.1. MODELOS BASEADOS NAS EQUAÇÕES RANS	33
4.4.2. LES - <i>LARGE EDDY SIMULATION</i>	35
4.4.3. DNS – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DIRETA.....	35
4.5. MÉTODOS PARA DISCRETIZAÇÃO NO ESPAÇO	36
4.5.1. MVF - MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	36
4.6. MALHAS	37
5. PROCEDIMENTO NUMÉRICO	41
5.1. PROCEDIMENTO GERAL E SOFTWARE UTILIZADO	41
5.2. CONFIGURAÇÃO A	43
5.2.1. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA.....	43
5.2.2. GERAÇÃO DA MALHA	43
5.2.3. CÁLCULO	46
5.3. CONFIGURAÇÃO B	53
5.3.1. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA E DA MALHA DA CONFIGURAÇÃO B	53
6. RESULTADOS NUMÉRICOS	55
6.1. SIMULAÇÃO Nº 1: CONFIGURAÇÃO A – MODELO LES.....	55
6.1.1. CAMPO DE VELOCIDADES	56
6.1.2. PRESSÕES.....	58
6.1.3. TENSÃO DE ARRASTAMENTO	60
6.1.4. IMPULSÃO HIDRODINÂMICA NO PILAR	62
6.2. SIMULAÇÃO Nº 2: CONFIGURAÇÃO A – MODELO SST $k-\omega$.....	63
6.2.1. CAMPO DE VELOCIDADES.....	64
6.2.2. PRESSÕES.....	65
6.2.3. TENSÃO DE ARRASTAMENTO	65

6.2.4. IMPULSÃO HIDRODINÂMICA NO PILAR	67
6.3. SIMULAÇÃO Nº 3: CONFIGURAÇÃO B – MODELO LES	68
6.3.1. CAMPO DE VELOCIDADES	68
6.3.2. PRESSÕES	70
6.3.3. TENSÃO DE ARRASTAMENTO.....	71
6.3.4. IMPULSÃO HIDRODINÂMICA NO PILAR	73
6.4. SIMULAÇÃO Nº 4: CONFIGURAÇÃO B – MODELO SST $K-\omega$.....	73
6.4.1. CAMPO DE VELOCIDADES	74
6.4.2. PRESSÕES	75
6.4.3. TENSÕES DE ARRASTAMENTO.....	76
6.4.4. IMPULSÃO HIDRODINÂMICA NO PILAR	77
6.5. SIMULAÇÃO Nº 5: PILAR COM 100 MM DE DIÂMETRO – MODELO LES.....	77
6.5.1. CAMPO DE VELOCIDADES	77
6.5.2. PRESSÕES	79
6.5.3. TENSÕES DE ARRASTAMENTO.....	81
6.5.4. IMPULSÃO HIDRODINÂMICA NO PILAR	83
6.6. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS	84
7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	85
7.1. ASPETOS GERAIS E CONCLUSÕES.....	85
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	86
BIBLIOGRAFIA.....	86
ANEXOS	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1.1 – Cavidade de erosão que originou o acidente em Schorarie Creek, EUA [1].....	2
Fig.2.1 – Alteração do campo de pressões do escoamento a montante de um pilar [7].....	6
Fig.2.2 – Estrutura do escoamento na proximidade de um pilar cilíndrico [8]	6
Fig.2.3 – Rotação do escoamento no plano de simetria [10]	7
Fig.2.4 – Caracterização do vórtice de ferradura através de corantes [17].....	7
Fig.2.5 – Formação do vórtice secundário [10]	8
Fig.2.6 – Processo de separação do escoamento ao redor de um pilar circular [15]	8
Fig.2.7 – Relação entre número de <i>Strouhal</i> e o número de <i>Reynolds</i> [13]	10
Fig.2.8 – Desprendimento de atração dos vórtices [13]	10
Fig.2.9 – Direção das componentes da força hidrodinâmica atuante no pilar, em planta [15]	11
Fig.2.10 – Variação de C_D com o número de <i>Reynolds</i> [14]	12
Fig.2.11 – Variação de C_L médio com Re [13]	12
Fig.2.12 – Diagrama de <i>Shields</i> [21]	13
Fig.2.13 – Diferentes fases da evolução a profundidade ao longo do tempo.....	14
Fig.3.1 – Canal visto de jusante	16
Fig.3.2 – Esquema longitudinal do canal [5]	16
Fig.3.3 – Grupos eletrobombas.....	16
Fig.3.4 – Calhas	17
Fig.3.5 – Macrorugosidades no início do canal.....	17
Fig.3.6 – Instalação do pilar	18
Fig.3.7 – Planta esquemática da posição do pilar	18
Fig.3.8 – Aspeto final da camada de areia.....	19
Fig.3.9 – Comporta.....	19
Fig.3.10 – Régua no pilar	20
Fig.3.11 – Limnímetro	20
Fig.3.12 – Malha de <i>nylon</i> para apoio à medição com limnímetro	20
Fig.3.13 – Caudalímetro <i>Sparling</i>	21
Fig.3.14 – Curva granulométrica da areia [4].....	21
Fig.3.15 – Evolução temporal da profundidade	22
Fig.3.16 – Nível da água à cota inicial da areia	23
Fig.3.17 – Nível da água à profundidade de 1.7 cm	23
Fig.3.18 – Nível da água à profundidade de 4.4 cm	23

Fig.3.18 – Nível da água à profundidade de 6.7 cm	23
Fig.3.19 – Contorno da cavidade, com a água a uma profundidade de 4.4 cm	23
Fig.3.20 – Contorno da cavidade, com a água a uma profundidade de 4.1 cm	23
Fig.3.21 – Curvas de nível da cavidade de erosão e assoreamento (escoamento no sentido da esquerda para a direita, cotas em cm)	24
Fig.3.22 – Corte longitudinal do canal	24
Fig.3.23 – Superfície de enrolamento, a montante do pilar	25
Fig.3.24 – Esteira turbulenta	25
Fig.4.1 – Espectro de energia de um escoamento turbulento [32]	30
Fig.4.2 – Evolução temporal da velocidade em escoamentos laminares e em escoamentos turbulentos [33]	30
Fig.4.3 – Esquematização de volume finito tridimensional	37
Fig.4.4 – Tipos de malhas [25] (adaptado)	37
Fig.4.5 – Exemplo de malha ortogonal [46]	38
Fig.4.6 – Exemplo de malha não ortogonal [46]	38
Fig.4.7 – Exemplo de malha não estruturada [46]	38
Fig.4.8 – Esquematização dos passos para a modelação numérica [25] (adaptado)	39
Fig.5.1 – <i>ANSYS Workbench</i>	42
Fig.5.2 – Geometria da Configuração A	43
Fig.5.3 – Menu <i>Sizing</i> do <i>ANSYS Meshing</i>	44
Fig.5.4 – Refinamento da malha (perto da zona de saída)	44
Fig.5.5 – Esfera de Influência em torno do pilar	45
Fig.5.6 – Pormenor da malha em torno do pilar	46
Fig.5.7 – Perspetiva geral da malha	46
Fig.5.8 – <i>Fluent Launcher</i>	46
Fig.5.9 – Menu Geral	47
Fig.5.10 – Escolha do modelo de turbulência	48
Fig.5.11 – Definição das propriedades dos materiais	49
Fig.5.12 – Caracterização da fronteira da secção de entrada	49
Fig.5.13 – Definição das características da superfície livre	50
Fig.5.14 – Escolha do modelo de solução	51
Fig.5.15 – <i>Resíduos</i> ao longo das iterações de uma das simulações realizadas	51
Fig.5.16 – Menu <i>Run Calculation</i>	52
Fig.5.17 – Modelo geométrico da configuração B (vista do fundo)	53

Fig.5.18 – Malha da configuração B	53
Fig.5.19 – Pormenor da malha em torno do pilar.....	54
Fig. 6.1 – Variação dos resíduos ao longo das iterações	55
Fig. 6.2 – Velocidades a 0.10 m do fundo do canal	56
Fig. 6.3 – Velocidades na esteira de vórtices a 10 cm do fundo	56
Fig. 6.4 – Velocidade longitudinal a 0.1 do fundo do canal	57
Fig. 6.5 – Velocidade longitudinal no eixo de simetria do canal	57
Fig. 6.6 – Distribuição percentual da velocidade das partículas.....	57
Fig. 6.7 – Velocidade longitudinal da superfície livre ao longo do eixo de simetria do canal	58
Fig. 6.8 – Pequenos indícios de estruturas que podem provocar escavação	58
Fig. 6.9 – Pressão estática (corte longitudinal a passar no eixo de simetria).....	59
Fig. 6.10 – Pressão dinâmica (corte longitudinal a passar no eixo de simetria).....	59
Fig. 6.11 – Pressão dinâmica a 10 cm do fundo.....	59
Fig. 6.12 – Pressão no fundo	60
Fig. 6.13 – Tensões de arrastamento no fundo do canal	60
Fig. 6.14 – Variação da tensão de arrastamento na secção transversal que contém o pilar	61
Fig. 6.15 – Tensões no fundo ao longo do canal	61
Fig. 6.16 – Tensões de arrastamento no fundo, ao longo do eixo de simetria	61
Fig. 6.17 – Posição do ponto (X,Y) em relação à curva de <i>Shields</i>	62
Fig. 6.18 – Pressão total no pilar.....	62
Fig. 6.19 – <i>Force report</i> para o pilar.....	63
Fig. 6.20 – Variação dos resíduos ao longo das iterações	63
Fig. 6.21 – Campo de velocidades a 10 cm do fundo.....	64
Fig. 6.22 – Velocidade longitudinal no eixo de simetria do canal	64
Fig. 6.23 – Velocidades a 0.1 cm do fundo	64
Fig. 6.24 – Pressão total no fundo	65
Fig. 6.25 – Pressão a 10 cm do fundo	65
Fig. 6.26 – Tensões de arrastamento no fundo	66
Fig. 6.27 – Tensões no fundo ao longo do canal	66
Fig. 6.28 – Posição do ponto (X,Y) em relação à curva de <i>Shields</i>	66
Fig. 6.29 – Variação da tensão de arrastamento na secção transversal que contém o pilar	67
Fig. 6.30 – <i>Force report</i> para o pilar	67
Fig. 6.31 – Pressão no pilar	67

Fig. 6.32 – Variação dos resíduos ao longo das iterações	68
Fig. 6.33 – Velocidade longitudinal no eixo de simetria do canal	68
Fig. 6.34 – Velocidades a 0.10 m da superfície livre.....	69
Fig. 6.35 – Linhas de trajetória das partículas	69
Fig. 6.36 – Distribuição da velocidade das partículas	69
Fig. 6.37 – Pressão no eixo de simetria do canal	70
Fig. 6.38 – Pressões estáticas (corte no eixo de simetria plano de simetria)	70
Fig. 6.39 – Tensões de arrastamento no fundo do canal	71
Fig. 6.40 – Variação da tensão de arrastamento na secção assinalada	72
Fig. 6.41 – Tensões no fundo ao longo do canal	72
Fig. 6.42 – Posição do ponto (X,Y) em relação à curva de Shields	72
Fig. 6.43 – Pressão no pilar	73
Fig. 6.44 – <i>Force report</i> para o pilar	73
Fig. 6.45 – Variação dos resíduos ao longo das iterações	74
Fig. 6.46 – Velocidades longitudinais no eixo de simetria do canal	74
Fig. 6.47 – Velocidades a 0.10 m da superfície livre.....	74
Fig. 6.48 – Pressões estáticas (corte longitudinal a passar no eixo de simetria)	75
Fig. 6.49 – Pressões dinâmicas (corte longitudinal a passar no eixo de simetria)	75
Fig. 6.50 – Tensão de arrastamento no fundo	76
Fig. 6.51 – Tensões no fundo ao longo do canal	76
Fig. 6.52 – Posição do ponto (X,Y) em relação à curva de <i>Shields</i>	76
Fig. 6.53 – <i>Force report</i> para o pilar	77
Fig. 6.54 – Variação dos resíduos ao longo das iterações	77
Fig. 6.55 – Velocidades a 0.10 m do fundo do canal	78
Fig. 6.56 – Campo de velocidades junto ao pilar	78
Fig. 6.57 – Velocidade longitudinal no eixo de simetria do canal	79
Fig. 6.58 – Pormenor dos vetores velocidade a 1 mm do fundo do canal	79
Fig. 6.59 – Pressão estática no fundo (t=20 s).....	79
Fig. 6.60 – Pressão estática no pilar (t=20 s).....	80
Fig. 6.61 – Pressões estáticas no fundo do canal, para um tempo de escoamento de t=12s	80
Fig. 6.62 – Pressão estática no pilar (t=12 s).....	81
Fig. 6.63 – Tensões de arrastamento no fundo do canal	81
Fig. 6.64 – Variação da tensão de arrastamento na secção transversal que contém o pilar (vista de jusante)	82

Fig. 6.65 – Tensões no fundo ao longo do canal	82
Fig. 6.66 – Posição do ponto (X,Y) em relação à curva de Shields.....	82
Fig. 6.67 – Tensões de arrastamento no fundo do canal, para $t=2s$	83
Fig. 6.68 – <i>Force report</i> para o pilar	83

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Variação do padrão de desprendimento de vórtices em esteira função do Re [15].....	9
Tabela 6.1 – Resultados de todas as simulações realizadas.....	85

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A_h - Área de projeção horizontal do pilar [m^2]

A_v - Área de projeção vertical do pilar [m^2]

C_D - Coeficiente de arrasto

C_L - Coeficiente de sustentação

C_μ - Constante empírica relativa ao modelo de turbulência

D - Diâmetro do pilar [m]

D_{50} - Diâmetro mediano das partículas do material do fundo [m]

f - Frequência do desprendimento de vórtices, em s^{-1}

F_D - Força de arrasto [N]

F_L - Força de sustentação [N]

g - Aceleração da gravidade (m^2/s)

h - Altura do escoamento [m]

h_s - Profundidade da cavidade de erosão [m]

h_{se} - Profundidade de equilíbrio da cavidade de erosão local [m]

i, j, k - Coordenadas vetoriais

I - Intensidade da turbulência

k - Energia cinética turbulenta

l - Comprimento característico de turbulência [m]

L - Comprimento do obstáculo na direção normal ao escoamento [m]

p - Pressão do fluido [Pa]

Re - Número de *Reynolds*

St - Número de *Strouhal*

t - Tempo

t_e - Tempo de equilíbrio

$u(y)$ - Velocidade do escoamento a uma distância y do fundo

U - Velocidade média do escoamento de aproximação [m/s]

U_c - Velocidade média crítica do escoamento de aproximação ou de início do movimento [m/s]

X_{cr} - Número de *Reynolds* associado ao início do movimento das partículas

x, y, z - Coordenadas cartesianas

Y - Parâmetro de *Shields*

u_{*c} - Velocidade de atrito crítica junto ao fundo ou relativa ao início do movimento [m/s]

u_i, u_j - Componentes vetoriais da velocidade

S_{ij} - Tensor de deformações

γ'_s - Peso volúmico do material submerso [N/m^3]

δ_{ij} - Delta de *Kronecker*

μ_t - Viscosidade turbulenta [m^2/s]

τ_c - Tensão de arrastamento crítica [Pa]

Δt - Tempo da fração de volume calculada

γ - Peso volúmico da água [N/m^3]

γ_s - Peso volúmico do material de fundo [N/m^3]

ε - Taxa de dissipação turbulenta

μ - Viscosidade dinâmica da água [m^2/s]

ρ - Massa volúmica da água [kg/m^3]

ρ_s - Massa volúmica do material do fundo [kg/m^3]

σ_D - Coeficiente de graduação ou desvio padrão geométrico da distribuição granulométrica do material do fundo

φ - Função genérica

ν - Viscosidade cinemática da água [m^2/s]

ν_T - Viscosidade cinemática turbulenta da água [m^2/s]

ω - Taxa de dissipação específica

CICA – Centro de Informática Prof. Correia de Araújo

CFD - *Computacional Fluid Dynamics*

CFL - Número de *Courant–Friedrichs–Lewy*

DNS - *Direct Numerical Simulation*

FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LES - *Large Eddy Simulation*

MEF - Método dos elementos finitos

MVF - Método dos volumes finitos

PISO - *Pressure-Implicit with Splitting of Operators*

PVC - Cloreto de Polivinila

QUICK - *Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics*

RAM - *Random Access Memory*

RANS - *Reynolds Averaged Navier-Stokes*

RNG - Modelo $k-\epsilon$ Renormalization

RSM - Modelos de tensão de Reynolds

SIMPLE - *Semi-Implicit Method for Pressure Splitting of Operators*

SST - *Shear-Stress Transport*

UBI - Universidade da Beira-Interior

VC - Volume de controlo

VOF - *Volum of Fluid*

WALE - *Wall-adapting local eddy-viscosity*

1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO E ENQUADRAMENTO GERAL

“Em muitos aspetos, a história da construção de pontes é a história da civilização. Através dela, podemos medir uma parte importante do progresso de um povo.”

Franklin D. Roosevelt

O aperfeiçoamento das vias de comunicação e o prolongamento do seu alcance é tanto uma das causas como um dos efeitos imediatos do desenvolvimento económico de uma sociedade. Como evidência, tome-se o caso do Rio Douro: ao longo de décadas, o crescimento económico e demográfico das cidades que separa obrigou à construção de várias pontes unindo as margens de Porto e Gaia.

Na generalidade dos casos, a estrutura da ponte tem os seus pilares fundados no leito do rio que transpõe. A presença destes obstáculos na água é responsável por fenómenos que propiciam o surgimento de uma cavidade no leito do rio, denominada cavidade de erosão. A erosão localizada junto de pilares pode comprometer a sua estabilidade e, conseqüentemente, a da ponte.

O objetivo primordial desta dissertação passa pela modelação numérica de um escoamento em torno de um pilar, a fim de conseguir compreender melhor os seus efeitos no escoamento, podendo servir para antecipar soluções para os problemas que deles possam advir. Pretende-se modelar o escoamento em duas configurações diferentes de fundo fixo: na primeira o pilar assenta sobre um fundo plano, enquanto na segunda, o mesmo assenta sobre um fundo com cavidade de erosão. A configuração com fundo plano representa uma situação inicial de arranque do processo erosivo. Já a segunda configuração representa uma situação final do processo erosivo após este ter atingido a profundidade de equilíbrio. Para gerar a geometria da segunda configuração será necessário definir as dimensões da cavidade de erosão. Para isso, realizou-se um ensaio laboratorial, no canal do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Campo de velocidades, pressões e tensões são alguns dos parâmetros que se pretendem quantificar com a simulação numérica, permitindo, assim, caracterizar as ações que o escoamento exerce no obstáculo que, no caso, é um pilar circular. Futuramente, este estudo poderá servir de base para formular soluções ou medidas de mitigação do problema descrito.

Este estudo insere-se no projeto de investigação, “Estudo experimental de erosões localizadas junto de pilares complexos” (PTDC/ECM/101353/2008), apoiado pela Fundação para Ciência e a Tecnologia (FCT), do qual fazem parte várias instituições de ensino superior.

1.2 MOTIVAÇÃO

Ao longo de décadas, os fenómenos de erosão têm estado na génese de vários acidentes em pontes. Uma vasta combinação de fenómenos está na origem deste tipo de acidentes. A erosão localizada junto de pilares é um desses fenómenos, sendo sobre esse tema que se debruça a presente dissertação. Em Portugal, um caso recente que mereceu forte cobertura mediática foi o colapso da ponte *Hintze Ribeiro*, em Castelo de Paiva, que resultou na morte de dezenas de pessoas e que, em última análise, contribuiu para a sensibilização do público e das entidades para a importância deste tipo de problemas. Infelizmente, não foi um caso isolado. Outros desastres ocorreram por todo o mundo, como, por exemplo, na Ponte *Blackmount*, na Nova Zelândia, nos Rios *Hatchie* e *Schorarie Creek* (figura 1.1), ambos nos Estados Unidos [1] e na Ponte *Glanrhyd*, no País de Gales [2].

O estudo da erosão localizada junto de pilares de pontes continua, por isso, a ser um tema da maior importância para a engenharia. Tradicionalmente, estes estudos assentam em experiências realizadas em ambiente laboratorial controlado, por vezes sujeitos a limitações do efeito de escala, que são intransponíveis. Com o desenvolvimento de códigos numéricos estáveis, aumento exponencial da capacidade de processamento dos computadores modernos e a queda abrupta dos seus custos, a modelação numérica do escoamento em torno de pilares apresenta-se como uma alternativa económica e fiável.

Um dos grandes desafios na área da modelação numérica é a simulação de escoamentos turbulentos. Esta área da investigação científica e tecnológica está em contínuo desenvolvimento, tendo-se, nos últimos anos, aprimorado os modelos computacionais, graças ao desenvolvimento exponencial dos computadores [3]. O autor pretende, com este trabalho, dar um pequeno passo no ainda longo caminho a percorrer para compreender a dinâmica deste problema, contribuindo assim para o conhecimento nesta área.



Fig. 1.1 – Cavidade de erosão que originou o acidente em *Schoharie Creek*, EUA [1]

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em 7 capítulos, sendo o primeiro de carácter introdutório, no qual este subcapítulo está incluído.

No segundo capítulo é apresentado o fenómeno da erosão em pilares, e são também caracterizados os escoamentos em torno de obstáculos.

O terceiro capítulo expõe a metodologia de preparação e realização do ensaio laboratorial e as suas características técnicas, assim como os resultados nele obtidos.

O capítulo 4 incide na modelação numérica de fluidos. Aqui são apresentadas as equações governativas de escoamentos, modelos de turbulência, malhas a utilizar, entre outras particularidades desta área.

No quinto capítulo é descrito o procedimento seguido na utilização do *software* através do qual se efetuam as simulações numéricas do escoamento pretendido.

O sexto capítulo constitui a apresentação e discussão de resultados. As simulações realizadas são analisadas e comparadas entre si, e os seus resultados são comparados aos sugeridos pela bibliografia.

O capítulo 7 consiste na síntese, conclusão e considerações finais desta dissertação. As conclusões retiradas do estudo deste problema são aí apresentadas, assim como os possíveis desenvolvimentos que poderão ter continuidade no futuro.

2

ESCOAMENTOS EM TORNO DE PILARES. EROSÃO EM PILARES.

O processo erosivo pode ser dividido, genericamente, em erosão geral ou erosão localizada. A erosão em leitos constituídos por fundos de sedimentos uniformes, (areias com coeficiente de graduação $\sigma_D < 1.5$, limite máximo considerado pela literatura em geral), por ação de escoamento sem transporte sedimentar ocorre sempre que $U_c / U > 1$, onde U representa a velocidade média do escoamento e U_c a velocidade crítica, que é a necessária para que se inicie o arrastamento de partículas [4]. A erosão geral deve-se aos elevados caudais e à existência de curvas ou confluências de escoamento, não dependendo, portanto, da existência de obstáculos. A erosão localizada pode assumir a forma de erosão local, quando associada a obstáculos, ou de contração lateral do escoamento, quando se verifica a diminuição da secção do escoamento por eles provocada ou por uma diminuição natural da secção de escoamento do rio [5].

A erosão em torno de um pilar resulta do efeito de inúmeros intervenientes, os quais não poderão ser antecipados na totalidade através de uma previsão simples. De seguida, são descritas as estruturas do escoamento geradas em torno do pilar que intervêm no processo de erosão localizada.

2.1 CARATERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO EM TORNO DE UM PILAR

A presença de um obstáculo no escoamento introduz uma variação no campo de velocidades à sua volta. Essas velocidades aumentam do fundo para a superfície e podem ser traduzidas por uma lei logarítmica (equação 2.1). À medida que o escoamento se aproxima do pilar a sua velocidade decresce, até ao ponto em que se anula na sua face de montante. Este efeito é denominado por efeito de estagnação. Isto faz com que a pressão sofra um incremento, Δp , que é dado pela equação 2.1.

$$\Delta p = \frac{\rho [U(y)]^2}{2} \quad (2.1)$$

em que ρ representa a massa volúmica da água e $U(y)$ é a velocidade do escoamento à distância y do fundo do rio ou canal [6].

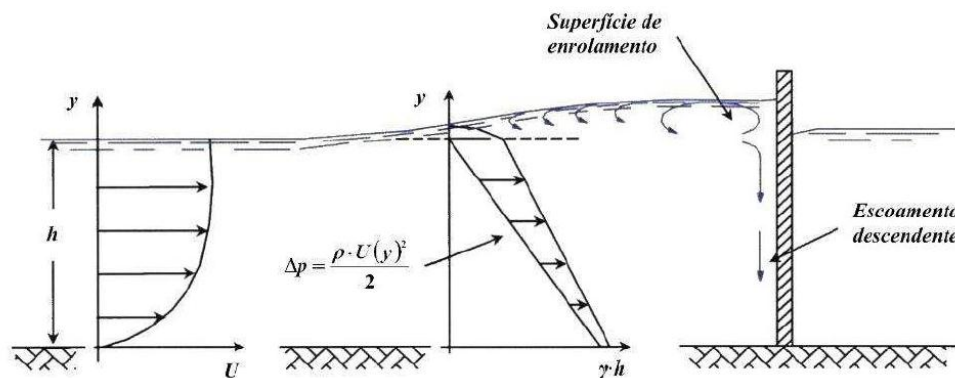


Fig. 2.1 – Alteração do campo de pressões do escoamento a montante de um pilar [7]

Este incremento é tanto maior quanto maior for a diminuição da velocidade, o que provoca um diferencial de pressões na face de montante do pilar (figura 2.1). Como consequência desta alteração do campo de pressões pode observar-se [7]:

- O aumento do nível da superfície livre a montante do pilar e a formação de uma superfície de enrolamento ou rolo. Também se verifica a existência de um escoamento descendente em forma de jacto, no sentido das maiores para as menores pressões. Este escoamento, ao incidir no leito, é parcialmente deflectido para montante. Alguns autores consideram que o escoamento descendente é o responsável pelo início da migração dos sedimentos à volta do pilar (figura 2.2);
- A separação do escoamento junto ao fundo, um pouco a montante do obstáculo, e na superfície lateral do pilar. Juntamente com o escoamento descendente dá origem ao vórtice em ferradura (figuras 2.2 e 2.4) que, segundo outros autores, é o fenómeno causador do início da erosão [6].

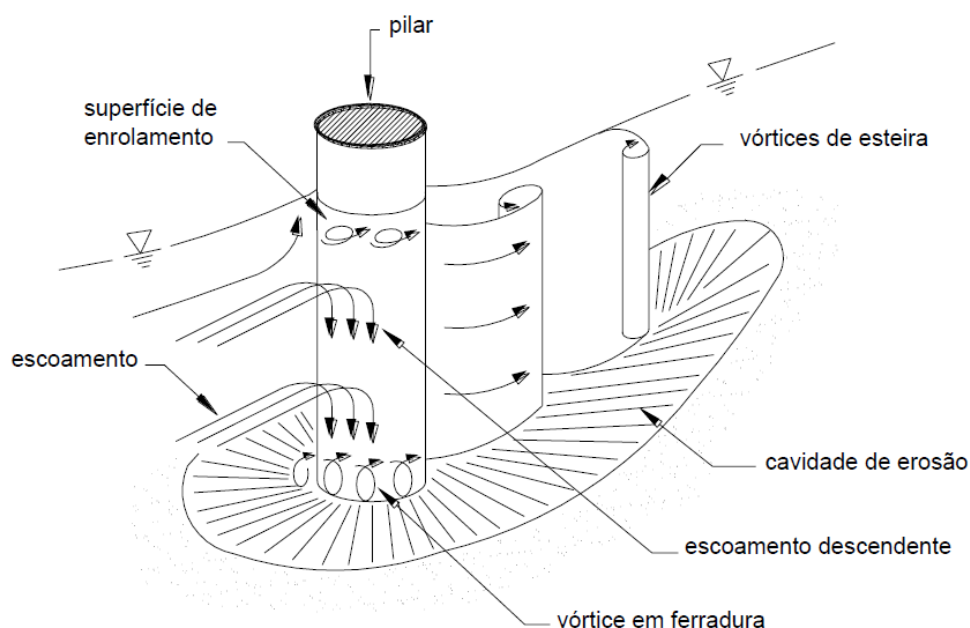


Fig. 2.2 – Estrutura do escoamento na proximidade de um pilar cilíndrico [8]

O escoamento em torno do pilar individualiza duas regiões distintas [9]:

- a principal, um escoamento de aproximação;
- a região de escoamento secundária, ditada pelas características viscosas.

O vórtice em ferradura forma-se devido à rotação horizontal do escoamento de aproximação, na linha de estagnação do escoamento de aproximação (figura 2.3).

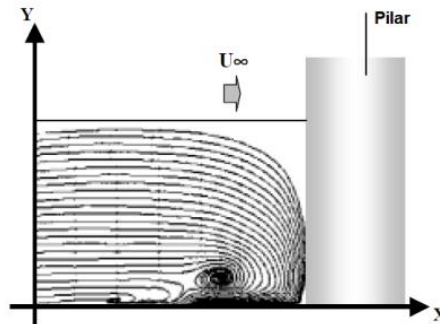


Fig. 2.3 – Rotação do escoamento no plano de simetria [10]

À medida que a água contorna o pilar, parte do escoamento de aproximação começa a galgar a região de separação. No decurso, forma-se também uma concentração de vorticidade dentro da camada limite que começa a girar. Dentro dessa camada de separação, na face frontal do cilindro, o vórtice desenvolve-se lateralmente, sofrendo deformação e estiramento em torno do cilindro, assumindo uma forma tridimensional que faz lembrar uma ferradura. Ainda não se compreende inteiramente a interação entre inércia, pressão e forças viscosas que atuam neste processo [10].

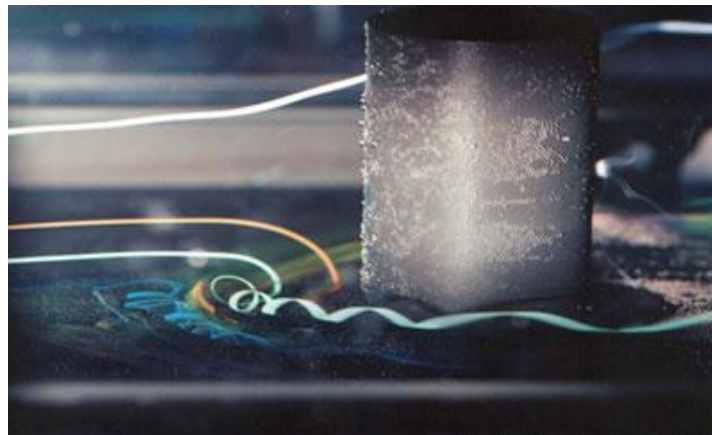


Fig.2.4 – Caraterização do vórtice de ferradura através de corantes [11]

Estudos sobre a interação de vórtices com superfícies provam que na região do leito do canal próxima do vórtice ferradura se forma uma concentração de vorticidade de sinal oposto ao vórtice, sob a forma de um vórtice secundário (figura 2.5). Em certos casos sucede que, após a formação do vórtice secundário, se gera ainda um terceiro, de mesmo sinal de vorticidade do primeiro (figura 2.6) [12].

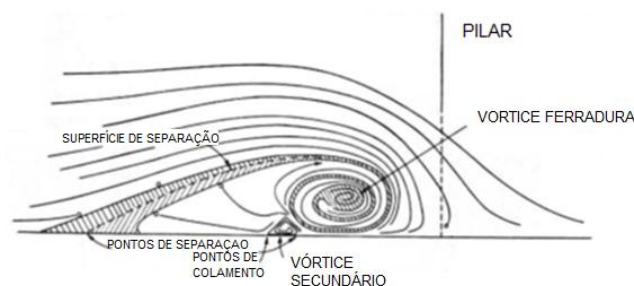


Fig. 2.5 – Formação do vórtice secundário [10]

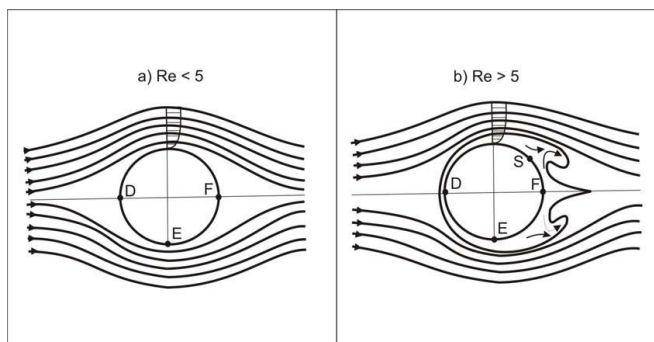
O vórtice em ferradura prolonga-se para jusante até se dissipar, contribuindo para a turbulência do escoamento e, assim, tem um papel ativo na escavação do fundo na zona a montante e a jusante do pilar [9].

O pilar gera a separação do escoamento próximo à sua superfície. A formação e desprendimento de vórtices a jusante do obstáculo dependem da relação entre as forças deste corpo [13]. O parâmetro adimensional que relaciona as forças viscosas e de inércia é o número de *Reynolds*, que é dado pela equação 2.2 [14]:

$$Re = \frac{D * U}{\nu}, \quad (2.2)$$

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

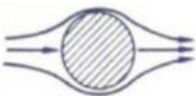
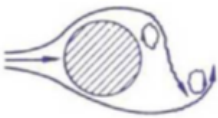
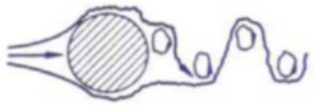
Em escoamentos laminares, a primeira condição para a formação da esteira de vórtices é a ocorrência da separação da camada limite formada sobre a superfície do pilar. No início do escoamento, as partículas do fluido sofrem uma aceleração entre as posições D e E marcadas na figura 2.6.a) e, de seguida, desaceleram entre as posições E e F, de forma que estas partículas alcançam F com velocidade aproximadamente igual à que tinham em D. Entre D e E, a energia de pressão converte-se em energia cinética, e de E a F, verifica-se o oposto. Estas transformações de energia cinética em energia de pressão, e vice-versa, são transmitidas para a partícula de fluido que se move próximo à parede do obstáculo, através da interação entre a camada limite e o escoamento externo [15].

Fig. 2.6 – Processo de separação do escoamento ao redor de um pilar circular; a) $Re < 5$; b) $Re > 5$ [15]

Quando o número de *Reynolds* aumenta ($Re > 5$, figura 2.6.b), as tensões viscosas aumentam e a partícula que se desloca entre D e E, vê parte de sua energia cinética ser consumida, e, por isso, deixa de ter energia suficiente, ao chegar à região E-F, para descrever a mesma trajetória efetuada pelas

partículas no início do escoamento. Isto, juntamente com a pressão causada à partícula pelo escoamento externo, causa a separação da camada limite nos dois lados do cilindro. A separação do escoamento resulta na formação de duas camadas de corte a jusante do cilindro, que resultarão em dois vórtices de sinais opostos, que formam um determinado padrão de desenvolvimento para jusante, dependente do número de *Reynolds* [15]. Na tabela 2.1 pode observar-se os padrões de escoamento típicos, em função do número de *Reynolds*. As imagens mostram a esteira resultante de um escoamento, da esquerda para a direita.

Tabela 2.1 – Variação do padrão de desprendimento de vórtices em esteira função do *Re* [15]

<i>Re</i>	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 <i>Reynolds</i> .
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 <i>Von Kármán</i> , que, nesta faixa de <i>Reynolds</i> , é laminar.
150 a 300		Transição à turbulência da esteira de vórtices	Ocorre a transição à turbulência da esteira de vórtices de <i>Von Kármán</i> 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 $3,5 \times 10^5$		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.
$> 3,5 \times 10^6$		A esteira de vórtices é restabelecida	Restabelecimento de uma esteira de vórtices turbulenta.

Quando normalizada pela velocidade do escoamento de aproximação, U e pelo diâmetro do cilindro, D , a frequência de desprendimento dos vórtices, f , pode ser descrita através do número de *Strouhal*, que é dado pela equação 2.3 [14].

$$St = \frac{f * D}{U} \quad (2.3)$$

Este parâmetro é assim chamado, em homenagem ao pesquisador checo Cenek V. Strouhal, que foi o primeiro a realizar medições de frequência do fenómeno.

A relação entre o número de *Strouhal* e o número de *Reynolds* é dada graficamente pela figura 2.7.

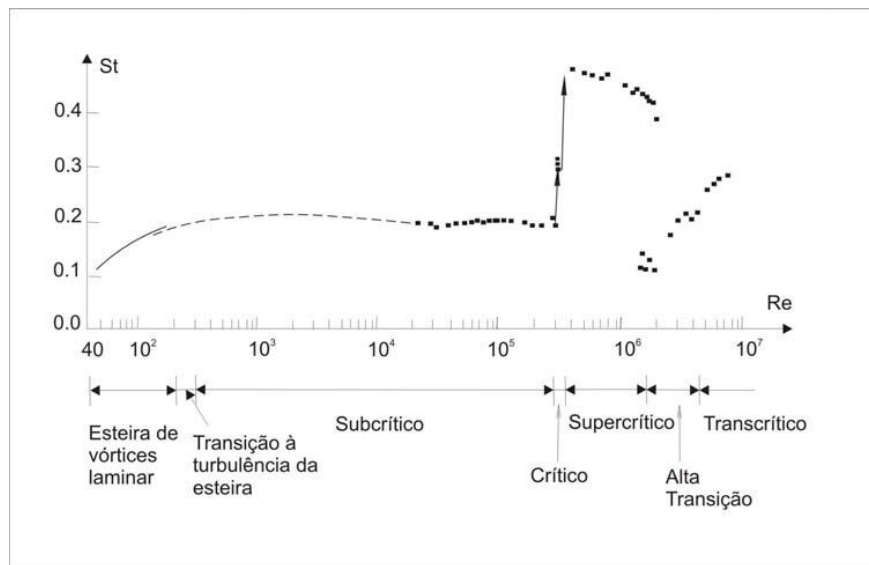


Fig. 2.7 – Relação entre número de *Strouhal* e o número de *Reynolds* [13]

Para se perceber o processo de desprendimento dos vórtices, atentar na figura 2.8. Quando a região de vorticidade B se forma, é atraída pela camada de corte do seu lado oposto, o que faz com que atravesse o plano de simetria que separa as duas camadas de corte, cortando o fornecimento de vorticidade da região de sinal oposto A. Esta, por sua vez, desprende-se do cilindro dando origem à formação do vórtice A. Desprendido o vórtice A, a camada limite formará uma outra região C de mesmo sinal de vorticidade que irá descrever o mesmo movimento da região B [13].

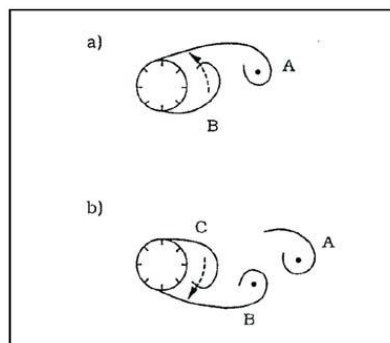


Fig. 2.8 – Desprendimento de atração dos vórtices [13]

Depois do desprendimento, os vórtices deslocam-se para jusante, em sentido horário e anti-horário, alternadamente, formando um padrão regular. Estes vórtices não se misturam com o escoamento exterior e somente se dissipam por fricção interna depois de um longo período de tempo [16].

O processo de desprendimento dos vórtices de esteira é um fenómeno a ter em conta no dimensionamento dos pilares, já que é responsável por variações de pressão, causando esforços dinâmicos que induzem oscilações. Isto constitui um risco, uma vez que estes esforços dinâmicos podem provocar a falha da estrutura caso seja atingida a frequência de ressonância [17].

2.2 FORÇAS HIDRODINÂMICAS ATUANTES NO PILAR

O escoamento provoca uma força no pilar, designada força hidrodinâmica, que pode ser decomposta na componente de arrasto (F_D), na direção longitudinal, e na componente de sustentação (F_L) na direção transversal (figura 2.9). Estas forças são correntemente representadas pelos coeficientes adimensionais, C_D e C_L , calculados pelas equações 2.4 e 2.5 [14]:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_v} \quad (2.4)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_h} \quad (2.5)$$

onde A_v e A_h representa as respetivas áreas de projeção vertical e horizontal do pilar.

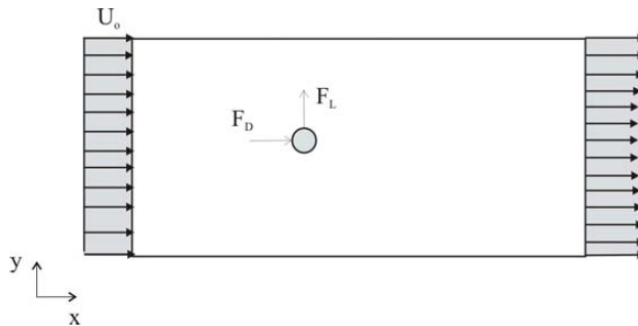


Fig. 2.9 – Direção das componentes da força hidrodinâmica atuante no pilar, em planta [14]

Em regime laminar, o valor do coeficiente de arrasto médio, C_D , decresce à medida que o Re aumenta. Em escoamentos com números de *Reynolds* situados entre 300 e 3×10^5 , os valores de C_D não variam muito, e quando o regime crítico é alcançado, ocorre uma queda brusca deste coeficiente (figura 2.10) [14].

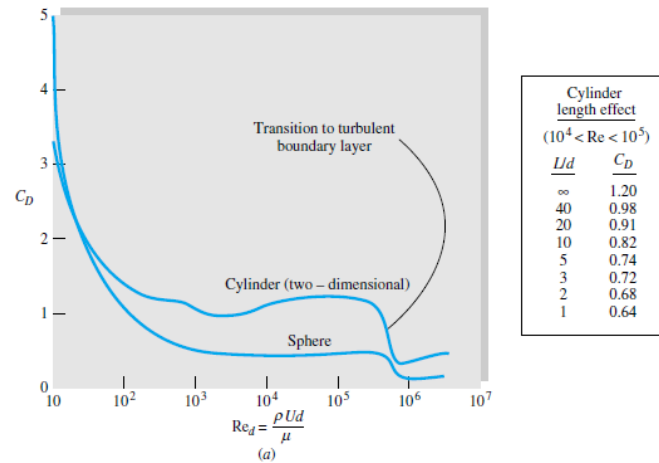


Fig. 2.10 – Variação de C_D com o número de *Reynolds* [14]

No caso do coeficiente de sustentação, até o número de *Reynolds* alcançar os 3×10^5 não ocorrem alterações significativas e o coeficiente de sustentação médio C_L assume valores nulos (figura 2.11). No entanto, na faixa de *Reynolds* do regime crítico ($3 \times 10^5 < Re < 3,5 \times 10^5$), o C_L chega a atingir valores superiores à unidade [15]. Para escoamentos simétricos, o coeficiente de sustentação é nulo [13].

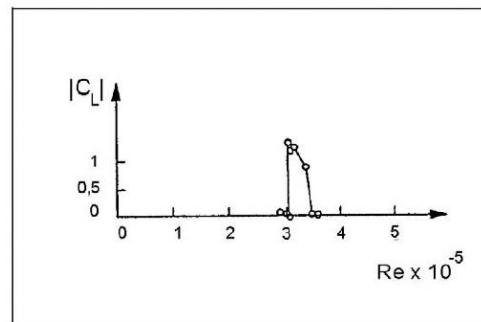


Fig. 2.11 – Variação de C_L médio com Re [13]

2.3 VELOCIDADE CRÍTICA DE ARRASTAMENTO

A máxima erosão é obtida para condições do escoamento próximas da velocidade crítica ($U \approx U_c$), ou seja, a velocidade média do escoamento que corresponde ao início do movimento das partículas [5]. Em trabalhos anteriores do projeto de investigação onde se insere a presente dissertação, tomou-se a fórmula de Neil [18], traduzida pela equação 2.6.

$$\frac{U_c^2}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right) \times g \times D_{50}} = 2.5 \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{0.2} \quad (2.6)$$

2.4 TENSÕES NO FUNDO

Shields [20] estudou as condições críticas da tensão de arrastamento junto ao fundo de leitos móveis, ou seja, o valor da tensão a partir do qual as partículas do leito iniciam o seu movimento. Pelo Diagrama de *Shields* (figura 2.12), é possível prever se vai ocorrer, ou não, movimento de partículas. A partir do conhecimento do diâmetro e da massa volúmica do material e da massa volúmica e viscosidade cinemática da água, é possível determinar o valor da tensão de arrastamento crítica, τ_c [21].

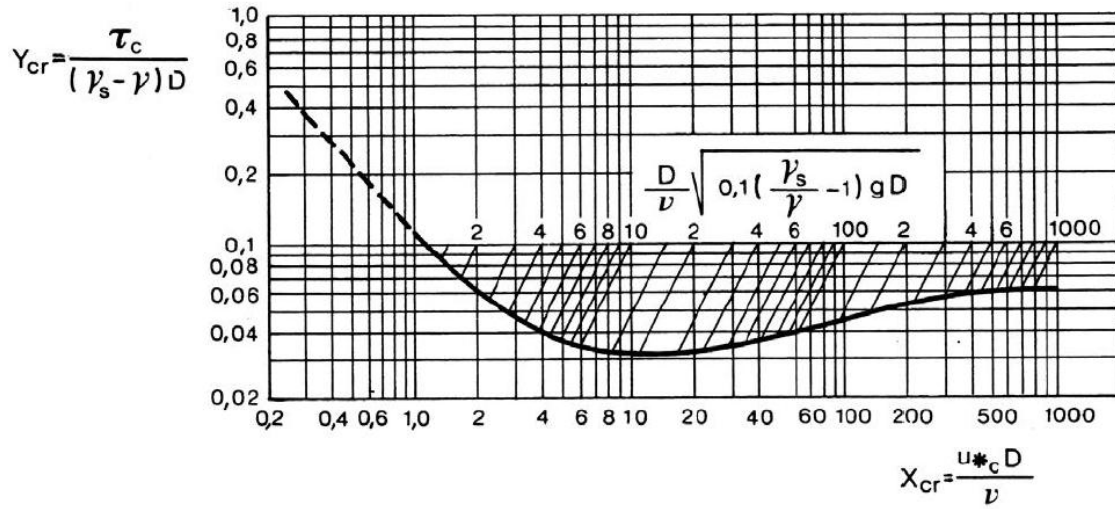


Fig. 2.12 – Diagrama de *Shields* [21]

Este diagrama relaciona dois parâmetros adimensionais representados por X e Y . O primeiro, X , representa o número de *Reynolds* das partículas definido através da velocidade de atrito junto ao fundo, U_{*c} , e o segundo, Y , designado por parâmetro de *Shields*, tem em conta a tensão entre os sedimentos e o escoamento. As curvas, desenvolvidas experimentalmente, representam a função $Y_{cr} = \varphi(X_{cr})$, cujos parâmetros são dados pelas equações 2.7 e 2.8 [21]:

$$X_{cr} = \frac{U_{*c} \times D}{\nu} = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \times \frac{D}{\nu} \quad (2.7)$$

$$Y_{cr} = \frac{\rho \cdot u_{*c}^2}{\gamma'_s \cdot D} = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot D} \quad (2.8)$$

Se o valor obtido de X e Y , para as condições do escoamento real, corresponder a um ponto situado na zona do gráfico acima da curva representada, o escoamento ocorre com transporte sólido generalizado. Se esse ponto estiver situado na zona inferior do diagrama, o escoamento faz-se sem transporte sólido proveniente de montante [21].

2.5 CAVIDADE DE EROSÃO

A cavidade de erosão causada pela presença do pilar no escoamento caracteriza-se pela acentuada inclinação do paramento de montante em relação ao pilar. No ponto imediatamente a montante deste, verifica-se a maior profundidade da cavidade de erosão, que é máxima quando o processo de erosão

atinge o equilíbrio, designando-se essa profundidade de h_{se} . A jusante do pilar, a inclinação do paramento é menor, tendo um elevado desenvolvimento para jusante, no entanto com profundidades inferiores [5].

Os fatores que influenciam a cavidade de erosão são [4]:

- Efeito da intensidade do escoamento;
- Efeito da altura de escoamento;
- Efeito das dimensões dos sedimentos do leito do rio;
- Efeito da forma do pilar;
- Efeito da direção do escoamento;
- Efeito da geometria do canal;
- Efeito do tempo.

Ainda não há consenso entre os autores acerca do tempo para o qual é atingida a profundidade máxima de erosão. Nos vários estudos realizados observam-se três fases na evolução da cavidade: fase inicial, fase principal e fase de equilíbrio. Estas fases são identificadas graficamente representando a evolução temporal da profundidade de escavação numa escala logarítmica. Na figura 2.13 é possível visualizar as três fases descritas através da mudança da inclinação das curvas. A representação da profundidade de erosão, h_s , é em função do logaritmo do tempo, $\log(t)$. O ensaio a realizar é dado por terminado quando se verifique que a fase de equilíbrio foi atingida [4].

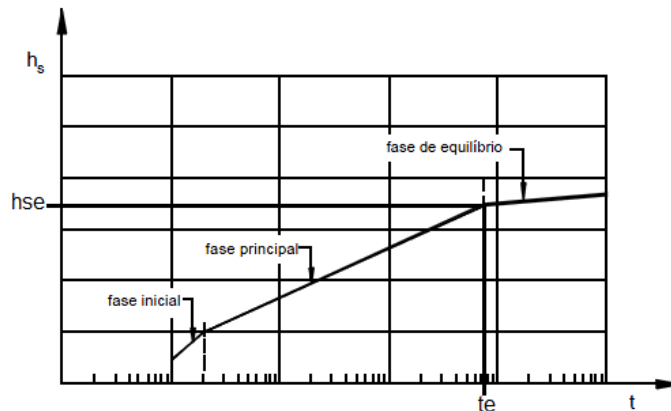


Fig. 2.13 – Diferentes fases da evolução da profundidade ao longo do tempo

3

ENSAIO LABORATORIAL

A atividade experimental, decorrida no Laboratório de Hidráulica da FEUP, teve como objetivo a caracterização da geometria da cavidade de erosão desenvolvida à volta da base do pilar, depois de atingido o equilíbrio no processo erosivo.

3.1 CARATERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

O ensaio foi realizado com uma altura de água de 0.2 m. Pela fórmula de Neil (equação 2.6) obtém-se o valor de 0.32 m/s, aproximadamente, para a velocidade crítica de arrastamento. Assim, dadas as dimensões do canal (1 m de largura), optou-se por gerar um escoamento com 0.2 m de altura o que leva a que as bombas forneçam um caudal de 64 l/s, correspondendo a uma velocidade 0.32 m/s ($U \approx U_c$).

O número de *Reynolds*, calculado com base no diâmetro do pilar (50 mm) é dado pela equação 2.2. A temperatura média da água, registada ao longo do ensaio, é de aproximadamente 20°C. Para este valor, a viscosidade cinemática é de $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [23]. Portanto, o escoamento apresenta um número de *Reynolds* de 15841. Consultando a tabela 2.1, espera-se uma esteira de vórtices completamente turbulenta, sendo que a camada limite sobre o pilar continua a ser laminar.

O número de *Strouhal* do escoamento pode ser obtido a partir da figura 2.7. Assim, este parâmetro toma o valor de 0.2, aproximadamente. A frequência de desprendimento dos vórtices do pilar é obtida a partir da equação 2.4, resultando em 1.28 Hz. Isto significa que a cada período de 0.78 segundos, um vórtice desprende-se do pilar. Dado o carácter turbulento do escoamento, outros vórtices de menor dimensão são formados [24].

A tensão crítica de arrastamento, referida no subcapítulo 2.4, para as características acima descritas, toma o valor de 0.5 Pa, calculado pelo Diagrama de *Shields*.

3.2 CARATERIZAÇÃO DAS INSTALAÇÕES

O canal onde se realizou o ensaio tem 1 metro de largura e 32,2 metros de comprimento. É dotado de uma caixa de sedimentos, com 3.30 metros de comprimento e 35 cm de profundidade, onde se instalou o pilar fundado em areia, e ainda outra, a jusante, para reter os sedimentos transportados (figuras 3.1 e 3.2). Para além de permitir a deposição do material granular, a caixa de retenção permite proteger os grupos eletrobomba evitando a passagem dos sedimentos para o circuito hidráulico, o que poderia provocar danos naqueles. Para uma adequada visualização do ensaio, as paredes do canal possuem janelas de vidro.



Fig. 3.1 – Canal visto de jusante

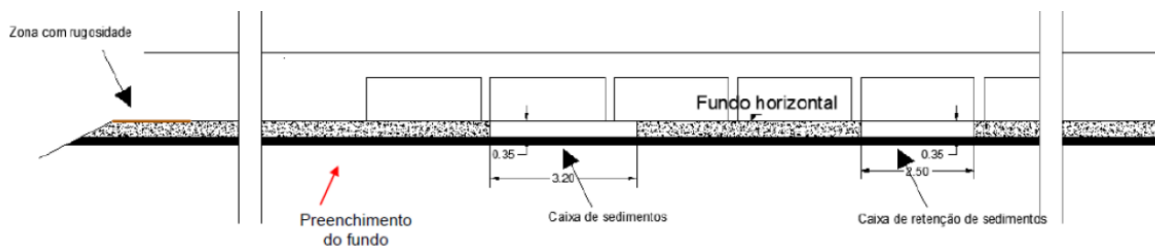


Fig. 3.2 – Esquema longitudinal do canal (distâncias em metros) [5]

Através de grupos eletrobomba (figura 3.3), a água é impulsionada de um reservatório a uma cota inferior, que recebe a água despejada pela secção de saída do canal, para um reservatório superior, de modo a percorrer o canal ciclicamente. Para garantir a existência de um nível de água constante no reservatório superior, este possui um sistema de calhas ao longo de toda a sua superfície (figura 3.4).



Fig. 3.3 – Grupos eletrobombas

O excedente entre o caudal proveniente dos grupos eletrobomba e o utilizado no canal é conduzido pelas calhas e posteriormente por uma conduta de descarga até ao reservatório inferior. As condutas de derivação descarregam num canal que conduz a água até um pequeno reservatório que leva à entrada do canal.



Fig. 3.4 – Calhas

As macrorugosidades à entrada do canal (figura 3.5) garantem que o escoamento é turbulento, pois desfazem a camada laminar do escoamento. Para regular a altura de escoamento desejada, dispõe-se de uma comporta de altura regulável na secção final do canal.



Fig. 3.5 – Macrorugosidades no início do canal

3.3 PREPARAÇÃO DO ENSAIO

Como pilar, foi usado um tubo de PVC com 50 mm de diâmetro exterior e 1.2 m de comprimento (figura 3.6). Para garantir a sua correta posição foram usadas réguas e níveis de bolha.



Fig. 3.6 – Instalação do pilar

A posição do pilar relativamente à caixa de sedimentos onde foi instalado encontra-se esquematizada na figura 3.7. O pilar foi instalado mais próximo da extremidade de montante da caixa de sedimentação, já que a cavidade de erosão se estende para jusante.

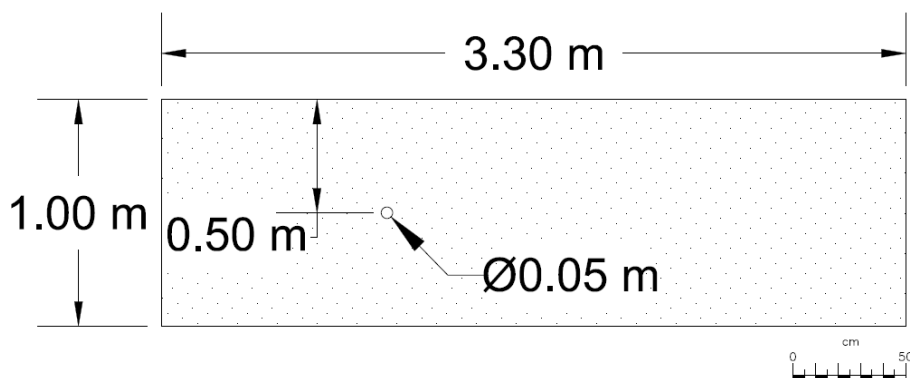


Fig. 3.7 – Planta esquemática da posição do pilar

Para garantir a verticalidade do tubo e evitar possíveis movimentos que fossem perturbar os resultados a obter, optou-se por fixar a zona inferior e a zona superior da tubagem, minimizando-se, deste modo, possíveis movimentos de rotação que poderiam ocorrer caso só existisse uma fixação, tal como foi descrito em dissertações anteriores [1] [4] [5]. Após correta fixação do pilar, a caixa de sedimentação foi cheia com areia, que foi compactada e alisada (figura 3.8). Depois de concluída a regularização da superfície do fundo de areia, protegeu-se a zona ao redor do pilar com duas grelhas metálicas revestidas a geotêxtil, a fim de evitar erosão antes de se obter o escoamento pretendido.



Fig. 3.8 – Aspeto final da camada de areia

O caudal fornecido pelos grupos eletrobomba tem que ser reduzido no início (≈ 3 l/s), de modo a evitar erosões indesejadas, e aumentado progressivamente, até atingir o valor para o escoamento desejado para a realização do ensaio. O uso da comporta a jusante do canal (figura 3.9) é também útil na regulação do escoamento. Depois de estabilizado o escoamento retiram-se as chapas metálicas com ajuda dos fios colocados nos seus cantos, retirando-se primeiro a placa de jusante e só depois a placa de montante, e dá-se início ao ensaio.



Fig. 3.9 - Comporta

3.4 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Na medição das profundidades da cavidade de erosão, foram usados vários equipamentos. Para medir a profundidade junto ao pilar, foi acoplada uma fita métrica ao tubo em PVC (figura 3.10). Para as medições de profundidades em vários pontos da cavidade da erosão, usou-se um limnómetro (figura 3.11) apoiado num suporte que permite fazer deslocamentos num plano horizontal, de modo a ter uma maior liberdade nos pontos a medir.

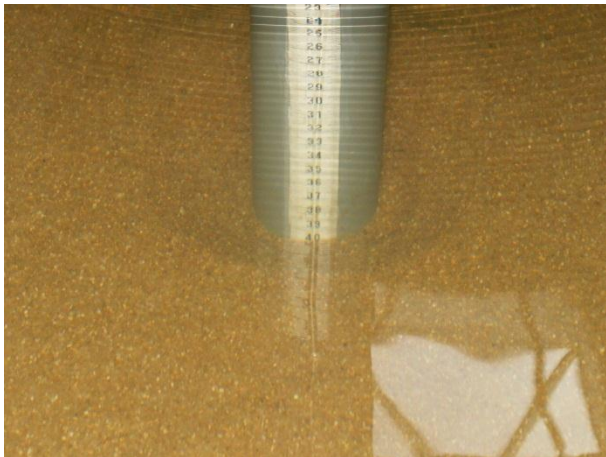


Fig. 3.10 – Régua no pilar



Fig. 3.11 – Limnímetro

De modo a conhecer profundidades em pontos estrategicamente definidos, foi construída uma malha de apoio à medição do limnímetro, constituída por fios de *nylon* espaçados de 5 cm, em que cada um deles tem pontos marcados com o mesmo espaçamento (figura 3.12).

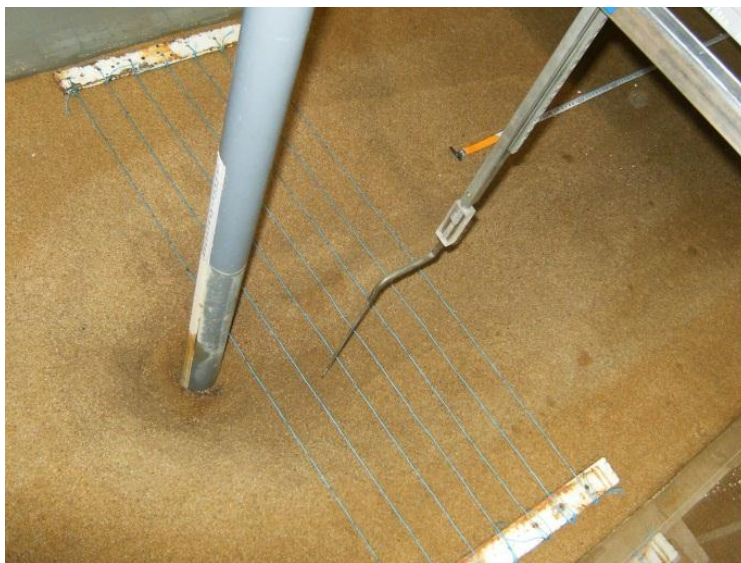


Fig. 3.12 – Malha de *nylon* para apoio à medição com limnímetro

A medição dos caudais é realizada através de dois caudalímetros eletromagnéticos, exemplificados na figura 3.13. Este equipamento foi instalado nas condutas de abastecimento da água, estando munido de um visor digital que indica o caudal instantâneo que passa naquelas condutas.



Fig. 3.13 – Caudalímetro Sparling

3.5 MATERIAL DO FUNDO

A areia utilizada como material de fundo para a realização dos ensaios foi obtida por peneiração a partir de areia retirada do rio Tejo. A caracterização granulométrica da areia (figura 3.14) foi conduzida em ensaio laboratorial, usando os procedimentos e especificações da norma NP-EN-933-1-2000. Do ensaio granulométrico resultaram os seguintes valores característicos: diâmetro mediano, $D_{50}=0,86$ mm, coeficiente de graduação, $\sigma_D=1,4$. A massa volumica, ρ_s , é de 2650 kgm^{-3} . Esta areia foi classificada como areia regular, pois possui um $\sigma_D < 1,5$, condição para a literatura a considerar como tal [4].

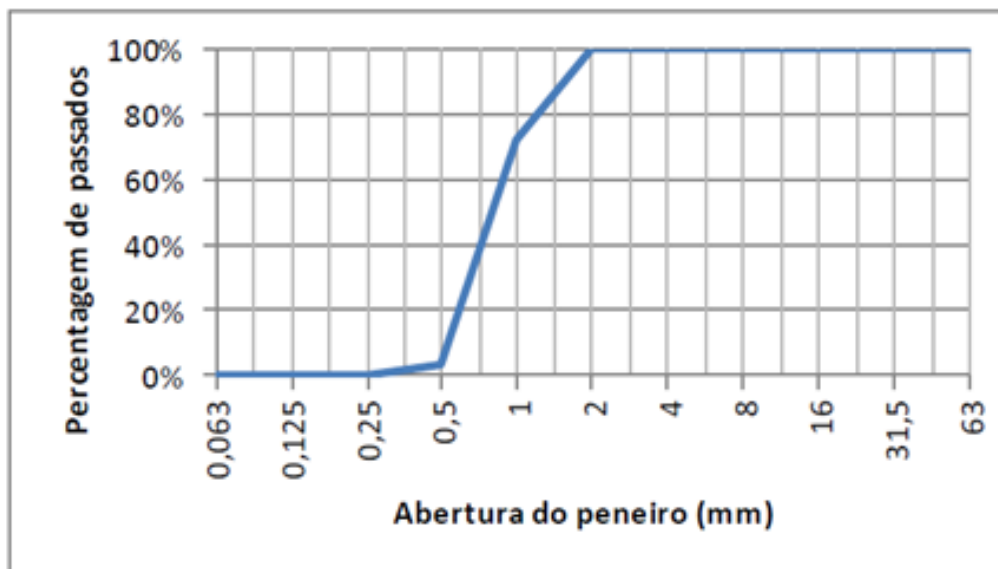


Fig. 3.14 – Curva granulométrica da areia [4]

3.6 TRATAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS

3.6.1 PROFUNDIDADE DE EQUILÍBRIO

Na realização deste ensaio, adotou-se um critério que admite que a cavidade de erosão atinge o equilíbrio quando o aumento da profundidade da mesma, em 24 horas, é igual ou inferior a 1 mm. Trata-se de uma regra mais exigente que o critério mais rigoroso presente na bibliografia, que sugere que, para este tipo de areia, o estado de equilíbrio é atingido quando o aumento da profundidade em 24 horas fosse inferior a 1.72 mm [7].

Ao longo do ensaio, efetuou-se o registo da profundidade imediatamente a montante do pilar, de modo a ter a perceção de quando fosse atingida a fase de equilíbrio. Registou-se também, para a mesma zona, medições com o limnómetro. No gráfico da figura 3.15 apresenta-se o conjunto das referidas medições, que pode ser comparada com a figura 2.13. O ensaio terminou ao fim de aproximadamente uma semana. A profundidade máxima registada foi de 12.2 cm.

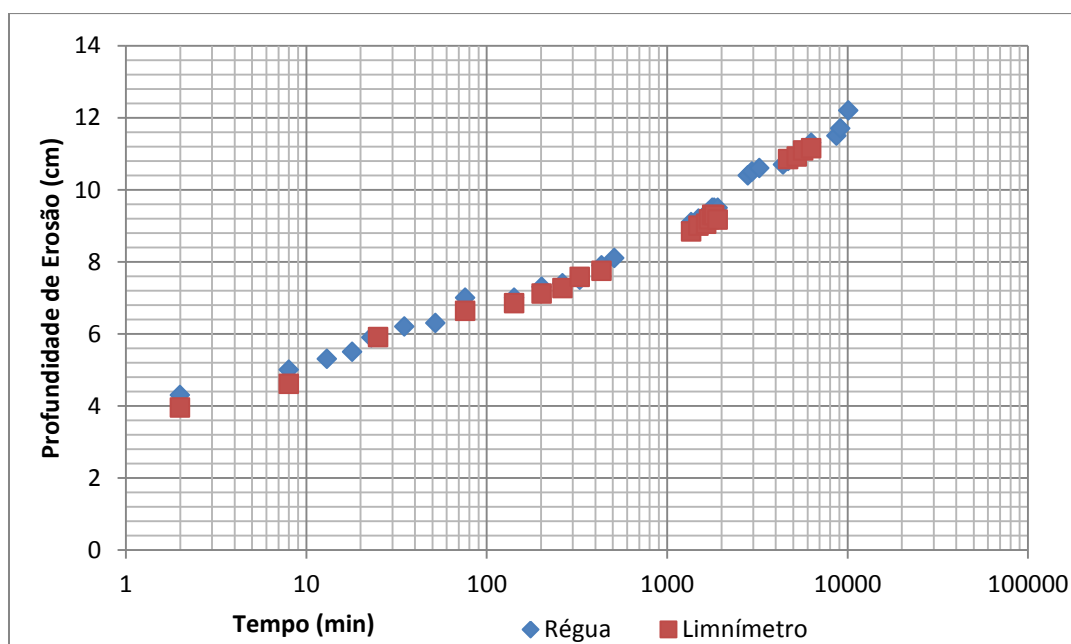


Fig. 3.15 – Evolução temporal da profundidade de erosão

As medições foram realizadas durante a primeira hora com intervalos de, aproximadamente, 10 minutos. Posteriormente, os intervalos entre medições foram sendo aumentados, progressivamente, até que, passado o primeiro dia, eram efetuadas apenas três ou quatro medições diárias. Para a presente dissertação, a evolução da cavidade de erosão não foi analisada, já que somente a geometria final da mesma foi necessária para as simulações numéricas.

3.6.2 CARACTERIZAÇÃO DA GEOMETRIA DA CAVIDADE DE EROSÃO

Para a caracterização geométrica da cavidade de erosão, foi adotado um método, que, apesar de não estar referenciado em nenhuma bibliografia, traduziu-se em resultados muito satisfatórios. Depois de desligadas as bombas, baixou-se o nível da água de uma maneira muito gradual, através da comporta de regulação e depois, através do dreno existente no fundo da caixa de sedimentos.

Como se pode verificar pelas figuras 3.16 a 3.19, a água depositada na cavidade de erosão permite visualizar os limites da cavidade de erosão para o nível da água. Para diferentes momentos do esvaziamento da caixa de sedimentos, foram tiradas fotografias da cavidade de erosão, com as quais foi possível construir um mapa de curvas de nível que caracterizem a cavidade de erosão. Para a correta medição das dimensões da cavidade, a máquina fotográfica teve que ser instalada numa plataforma a uma altura fixa em relação ao fundo do canal, de modo a ter a mesma escala na sequência de fotografias. As seguintes figuras são algumas das fotografias captadas durante este procedimento. O escoamento deu-se no sentido da esquerda para a direita.

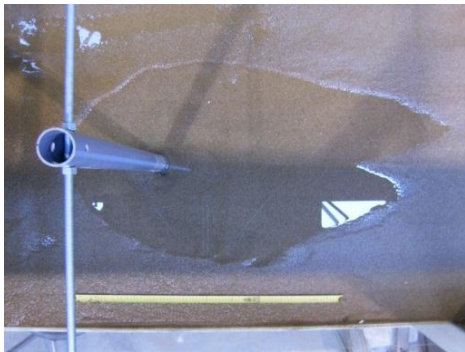


Fig. 3.16 – Nível da água à cota inicial da areia

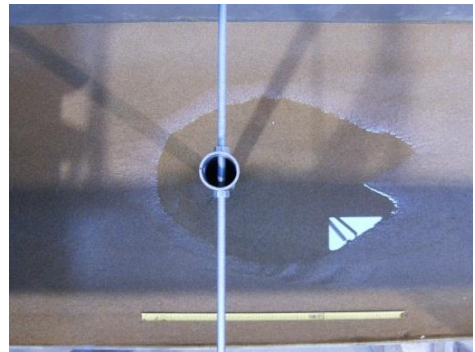


Fig. 3.17 – Nível da água à profundidade de 1.7 cm

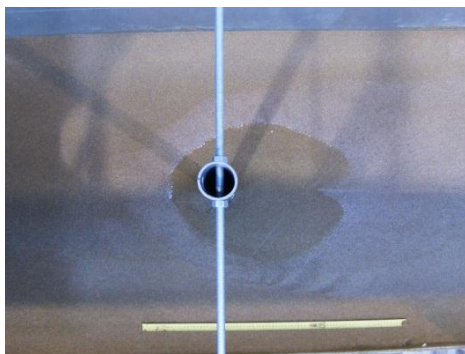


Fig. 3.18 – Nível da água à profundidade de 4.4 cm

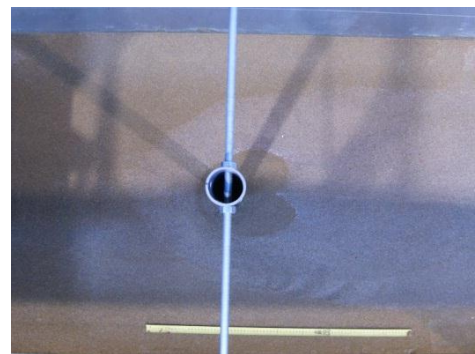


Fig. 3.19 – Nível da água à profundidade de 6.7 cm

Com recurso ao *AutoCAD*, traçou-se o contorno definido pela água na cavidade de erosão (figura 3.20), estando esta associada a uma determinada profundidade. Uma régua foi propositadamente deixada ao lado da cavidade, para controlar a escala da fotografia.

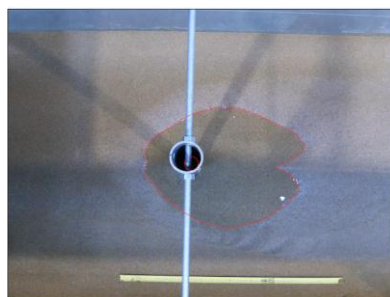


Fig. 3.20 – Contorno da cavidade, com a água a uma profundidade de 4.1 cm

Um número suficiente de fotografias foi conseguido, de modo a obter, pelo menos, uma curva de nível por cada centímetro de profundidade. Com o intuito de aumentar a precisão deste método, foram medidas as profundidades, recorrendo ao limnómetro, em vários pontos da cavidade de erosão, de modo a comprovar os dados obtidos através das fotografias. Após a sobreposição das várias curvas, obteve-se o mapeamento topográfico representado na figura 3.21.

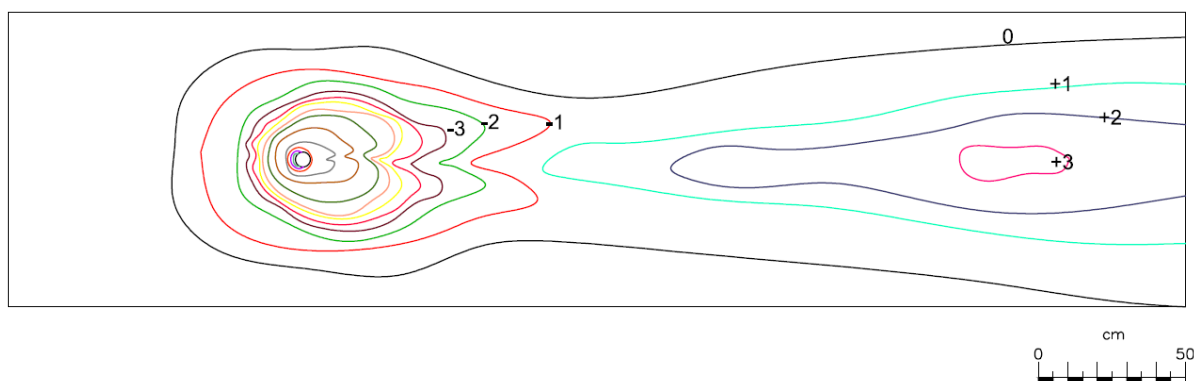


Fig. 3.21 – Curvas de nível da cavidade de erosão e assoreamento (escoamento no sentido da esquerda para a direita, cotas em cm)

O escoamento transportou os sedimentos que retirou do local da cavidade de erosão para uma zona a jusante desta, resultando no assoreamento que se pode ver nas figura 3.21 e 3.22, cuja elevação ultrapassa os 3 cm. Tal como defendido na bibliografia, verificou-se que a zona onde se observava a profundidade máxima da cavidade de erosão ocorria junto à face montante do pilar (daí ter-se colocado a fita métrica nesse sítio).

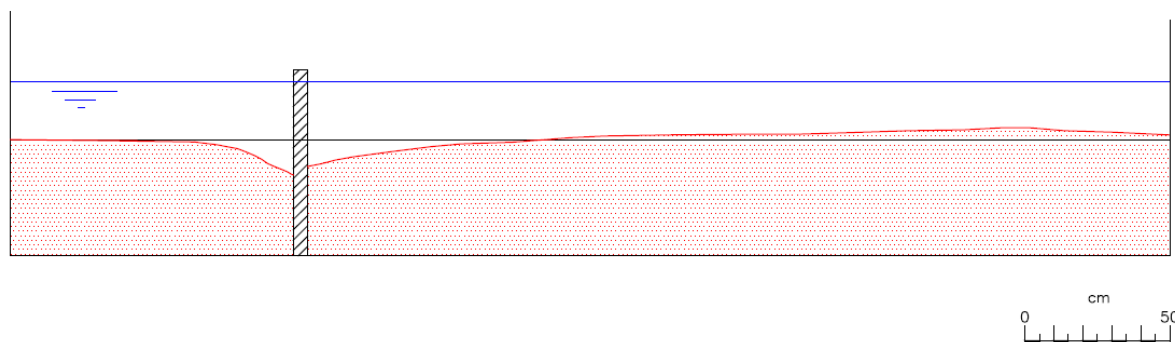


Fig. 3.22 – Corte longitudinal do canal

Com estes dados foi possível construir um modelo tridimensional para a modelação numérica do escoamento com o fundo na configuração B. É possível verificar, nos desenhos, uma ligeira assimetria na cavidade de erosão, que se encontra dentro do expectável para um ensaio laboratorial. No entanto, na construção do modelo numérico, optou-se por criar uma geometria simétrica para que os resultados numéricos das simulações não fossem influenciados pela eventual assimetria.

3.7 FENÓMENOS OBSERVADOS NO ESCOAMENTO

Com este ensaio, foi possível, para além de obter os dados exigidos para a modelação numérica, assistir às perturbações que a presença do pilar provoca no escoamento.

Na figura 3.23 está registado o comportamento da água imediatamente a montante do pilar. Assiste-se a uma certa elevação da superfície livre, mencionada no capítulo 2 (figura 2.1), e à propagação de uma pequena ondulação, para montante, formando a superfície de enrolamento anteriormente apresentada.



Fig. 3.23 – Superfície de enrolamento, a montante do pilar

Para este número de *Reynolds*, ocorre a separação laminar da camada limite mas a esteira é completamente turbulenta, como se pode comprovar pela figura 3.24.



Fig. 3.24 – Esteira turbulenta

4

MODELAÇÃO NUMÉRICA DE FLUIDOS

“All the mathematical sciences are founded on relations between physical laws and laws of numbers, so that the aim of exact science is to reduce the problems of nature to the determination of quantities by operations of numbers.”

James C. Maxwell, 1856

4.1 INTRODUÇÃO À MODELAÇÃO NUMÉRICA DE FLUIDOS

A Modelação Numérica de Fluidos ou Dinâmica de Fluidos Computacional (literatura inglesa *Computational Fluid Dynamics – CFD*) é o ramo da mecânica dos fluidos responsável pela simulação numérica dos fenómenos que ocorrem num determinado escoamento. A primeira geração de CFD apareceu na década de 50, no âmbito de investigações na área da aeronáutica, devido à necessidade de dar resposta a problemas complexos, cuja resolução sem auxílio de programas computacionais era impossível, um resultado do elevado número de variáveis que traduzem os fenómenos que se queriam estudar [25].

A sua aplicabilidade é vasta e o seu uso tem tendência a crescer, com o aparecimento de computadores cada vez mais rápidos, capazes de dar resposta às exigências de processamento e armazenamento de dados [26].

A abordagem de um problema através deste método apresenta as seguintes vantagens [27]:

- Diminuição apreciável do tempo e dos custos de obtenção da solução, comparativamente aos métodos tradicionais;
- A análise experimental em larga escala é complexa para sistemas de grandes dimensões. Um estudo CFD é uma escolha favorável;
- Os modelos numéricos dos sistemas físicos são precisos devido aos esquemas matemáticos bastante avançados;
- A evolução tecnológica na área dos computadores permite a obtenção de soluções detalhadas, até mesmo em computadores pessoais;

A simulação numérica do escoamento de fluidos implica a compreensão dos fenómenos físicos do sistema em estudo, já que são fulcrais na estrutura do problema numérico. Deles dependem as condições-fronteira e esquemas numéricos a desenvolver. Aliada à compreensão dos fenómenos

físicos deve estar a clara percepção de como funcionam os métodos CFD. Assim, os pilares fundamentais da modelação numérica de fluidos são descritos de seguida.

Uma simulação CFD deve ter em conta as seguintes propriedades [28]:

- **Consistência.** A precisão da solução deve ser tanto maior quanto menor for a dimensão dos elementos da malha. O valor da diferença entre a equação discretizada e o valor real chama-se erro de truncatura;
- **Estabilidade.** Os métodos utilizados não devem aumentar os erros gerados no decorrer do cálculo;
- **Convergência.** A solução deve convergir para um determinado valor;
- **Precisão.** Soluções numéricas do escoamento são soluções aproximadas, cuja exatidão dependerá de erros de modelação, de convergência, entre outros;
- **Conservação.** O processo de cálculo deve obedecer às leis de conservação, que serão descritas mais à frente.

O princípio básico do CFD passa por dividir o escoamento em pequenos elementos, constituindo uma malha de volumes finitos, e a cada elemento é aplicada uma série de equações resultante de três princípios governativos da dinâmica de fluidos [25]:

- Lei da Conservação da Massa ou Equação da Continuidade;
- Lei da Quantidade de Movimento (Segunda Lei de Newton);
- Lei da Conservação da Energia (Primeira Lei da Termodinâmica).

Para aplicar os princípios enumerados, é necessário recorrer a métodos de discretização numérica, descritos mais à frente. Uma vez que esta dissertação se debruça sobre a modelação numérica de um escoamento turbulento, será dada maior atenção a este tipo de escoamento.

4.2 EQUAÇÕES GOVERNATIVAS

4.2.1 CONSERVAÇÃO DA MASSA

A equação da continuidade representa, matematicamente, o princípio de conservação da massa, aplicado a um volume infinitesimal de fluido num escoamento, sendo descrito pela equação 4.1 [29].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0, \quad (4.1)$$

em que U_i é a componente da velocidade na direção i . Como a massa volúmica é constante ao longo do tempo para fluidos incompressíveis, como é o caso em estudo, pode aplicar-se a expressão $\partial \rho / \partial t = 0$ na equação anterior, ficando, na forma cartesiana dada pela equação 4.2 [29]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (4.2)$$

4.2.2 EQUAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

A 2ª Lei de Newton, aplicada a um elemento de fluido (na forma diferencial), relaciona as forças externas com as grandezas de massa e de aceleração $\bar{a} = D\bar{V}/Dt$. Substituindo o tensor das tensões viscosas pela relação constitutiva entre a tensão e a taxa de deformação para fluidos newtonianos e isotrópicos, obtém-se a equação de *Navier-Stokes* [29]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} (-\overline{\rho u'_i u'_j}), \quad (4.3)$$

em que μ é a viscosidade do fluido. Esta equação é aplicável a todos os escoamentos não-permanentes, de fluidos newtonianos. Assim, representa-se o balanço entre o produto da massa pela correspondente aceleração, isto é, a taxa de variação da quantidade de movimento, e também o conjunto de forças (gravíticas, de pressão e de atrito viscoso) a que essa massa se encontra sujeita e, ainda, ainda às variações de tensão aparente $(-\overline{\rho u'_i u'_j})$ devido ao campo de velocidade flutuante, geralmente referidas como tensões de *Reynolds*. O número de incógnitas ultrapassa o de equações para as determinar e, por isso, recorre-se a expressões com forte carga empírica, visando relacionar as novas incógnitas, designadas por “tensões” de *Reynolds*, com variáveis do escoamento médio. Estas relações são conhecidas por modelos de turbulência [29].

Regra geral, a equação 4.3 representa um sistema de equações determinado, já que existe uma equação para cada incógnita. A resolução das equações de *Navier-Stokes* é tão complexa que não é possível obter uma solução analítica, sendo necessária uma solução computacional, que exige uma capacidade de armazenamento e de velocidade de cálculo extraordinárias. Apenas recentemente, a tecnologia computacional se tem mostrado capaz de trabalhar com tais grandezas [17].

No entanto, a simulação direta da equação de *Navier-Stokes*, (DNS – *Direct Numerical Simulation* na terminologia inglesa) continua a ser uma tarefa complexa e muito demorada, estando limitada a sua aplicação a escoamentos com número de *Reynolds* muito baixo [28].

Para escoamentos turbulentos (situação mais habitual), onde o número de *Reynolds* é bastante elevado, a resolução direta da equação de *Navier-Stokes* apresenta-se inviável, motivo pelo qual foram desenvolvidos métodos alternativos, como a seguir se descreve [28].

4.3 ESCOAMENTOS TURBULENTOS

Na natureza e nas aplicações práticas, os escoamentos são maioritariamente de carácter turbulento [3]. Neste tipo de escoamento, as partículas apresentam movimento caótico macroscópico, isto é, a velocidade apresenta componentes transversais ao sentido do escoamento principal. As seguintes características apresentadas são também típicas de escoamentos turbulentos [24]:

- Irregularidade;
- Difusividade;
- Elevado número de *Reynolds*;
- Flutuações tridimensionais (vorticidade);
- Dissipação de energia.

Em suma, os escoamentos turbulentos são instáveis e são caracterizados por flutuações da velocidade no tempo e no espaço, sendo o tipo de escoamento de fluido mais complexo [24]. Como se percebeu pelo cálculo do seu número de *Reynolds*, o escoamento estudado no âmbito desta dissertação é de carácter turbulento.

Para além das peculiaridades já referidas, os escoamentos turbulentos são caracterizados pela formação de vórtices com uma vasta gama de escalas geométricas e de tempo [24]. As maiores estruturas (baixas frequências) são controladas pela geometria que as geram (pilar, neste caso), enquanto as menores estruturas (altas frequências) são controladas pela viscosidade do fluido (figura 4.1). As pequenas perturbações injetadas são naturalmente amplificadas, gerando instabilidade no escoamento, e são responsáveis pela dissipação de energia cinética da turbulência [31].

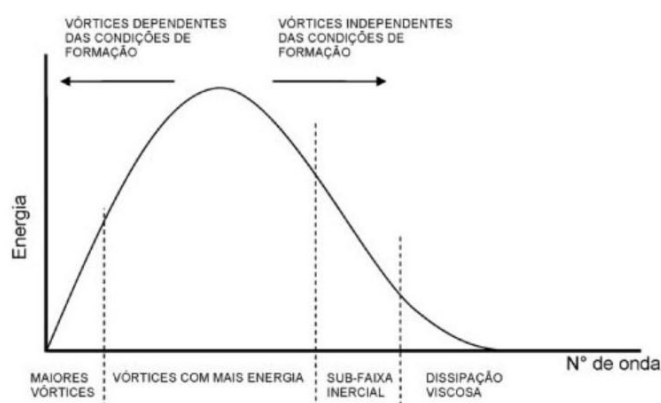


Fig. 4.1 – Espectro de energia de um escoamento turbulento [32]

Na figura 4.2, constata-se que a velocidade oscila em cada instante, em torno de um valor médio $\bar{u}$, independente do tempo. As flutuações, u' , correspondem à existência de turbilhões no seio do escoamento, a que se encontram associadas frequências de oscilação e dimensões próprias [29].

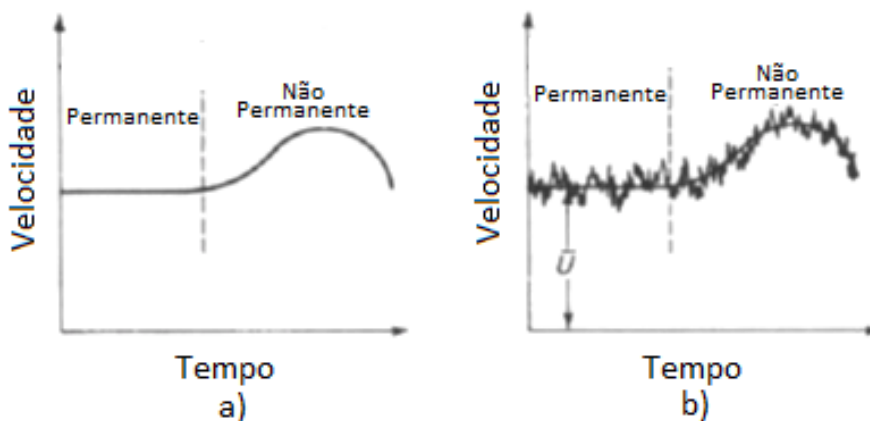


Fig. 4.2 – Evolução temporal da velocidade em escoamentos: a) laminares; b) turbulentos [33]

A aplicação direta das equações de *Navier-Stokes*, nestas condições, é muito complicada e dispendiosa. Reynolds sugeriu a seguinte decomposição, aplicável a cada variável dependente do problema [29]:

$$\text{Valor instantâneo} = \text{Valor médio} + \text{flutuação} \quad (4.4)$$

Esta decomposição é aplicada às equações de conservação de massa e de quantidade de movimento dando origem às equações de *Reynolds* ou equações *RANS* (*Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*), que se estudam no subcapítulo 4.4.1.

4.3.1 VARIÁVEIS CARACTERÍSTICAS DA TURBULÊNCIA

A introdução de equações de transporte adicionais que devem ser resolvidas utilizando os modelos de turbulência faz com que seja necessário usar valores característicos da turbulência, que a seguir se apresentam.

4.3.1.1 Intensidade da turbulência

A intensidade da turbulência, I , é dada pela razão do desvio quadrático médio da flutuação da velocidade, $\overline{u'^2}$, e a velocidade média do escoamento, $\bar{u}$ [29]:

$$I = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{u}} \quad (4.5)$$

4.3.1.2 Comprimento característico de turbulência

O comprimento característico de turbulência, l , é uma quantidade física que descreve o tamanho dos grandes vórtices em escoamento turbulentos, e o valor a adotar varia de modelo para modelo. É função de k , que é a energia cinética turbulenta e de ϵ , a taxa de dissipação turbulenta. Para este parâmetro foi adotado o valor de 0.143m, que corresponde ao valor do raio hidráulico do problema em questão, sendo um critério recomendado na bibliografia [29].

$$l = C_\mu \frac{k^{3/2}}{\epsilon} \quad (4.6)$$

onde C_μ é uma constante empírica especificada no modelo de turbulência, que toma o valor de aproximadamente 0.09 [29].

4.3.1.3 Energia cinética turbulenta

A relação entre a energia cinética turbulenta, k , e a intensidade da turbulência, I , partindo de I , como,

$$u' = \sqrt{\frac{1}{3}(u'^2_x + u'^2_y + u'^2_z)} = \sqrt{\frac{2}{3}}k, \quad (4.7)$$

então fica, em ordem a k ,

$$k = \frac{3}{2}(U \times I)^2 \quad (4.8)$$

4.3.1.4 Taxa de dissipação turbulenta

A partir do valor da energia cinética turbulenta k , e o do valor da viscosidade cinemática turbulenta, ν_T , é possível prever a taxa de dissipação turbulenta, ε , pela equação 4.9.

$$\varepsilon = C_\mu k^2 / \nu_T \quad (4.9)$$

4.3.1.5 Taxa de dissipação específica

Conhecendo o valor da energia cinética turbulenta, k e da taxa de dissipação turbulenta, ε , pode obter-se a taxa de dissipação específica, ω , pela relação [29]:

$$\omega = \varepsilon / C_\mu k \quad (4.10)$$

4.3.1.6 Viscosidade cinemática turbulenta

Relacionando a intensidade da turbulência com a viscosidade cinemática e o número de *Reynolds*, obtém-se o valor da viscosidade cinemática turbulenta.

A viscosidade turbulenta é dada por [29]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (4.11)$$

e sabe-se que:

$$\mu_t = \rho \nu_T, \quad (4.12)$$

logo, chega-se facilmente a:

$$\nu_T = 0.22 \nu I Re^{1/2} \quad (4.13)$$

4.4 MODELOS DE RESOLUÇÃO NUMÉRICA

Para a resolução numérica das equações de *Navier-Stokes* de escoamentos existem vários modelos, normalmente divididos em três grandes grupos [26]:

- Modelos baseados nas Equações Médias de *Reynolds* (RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*);
- *Large Eddy Simulation* (LES) – Método da Simulação das Grandes Escalas da Turbulência;
- *Direct Numerical Simulation* (DNS) – Simulação Numérica Direta (DNS).

A adequação das técnicas a empregar para as várias situações é muito importante quando se deseja representar os fenómenos físicos de acordo com a realidade.

4.4.1 MODELOS BASEADOS NAS EQUAÇÕES RANS

Como já foi exposto, os escoamentos turbulentos são caracterizados por flutuações da velocidade, no tempo e no espaço. Estes podem ser resolvidos pela aplicação direta das equações de *Navier-Stokes*, obtendo informação bastante fidedigna acerca dos fenómenos físicos que nele ocorrem, embora, dependendo do tipo de escoamento, se torne um processo demorado e dispendioso. Por isso, simplificaram-se essas equações, dando origem a um grupo de equações denominadas RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*, que permitem modelar mais escalas de turbulência [26].

As RANS resultam da média temporal das equações de *Navier-Stokes*. As equações de *Reynolds* escritas em coordenadas cartesianas são as seguintes [29]:

$$\text{Conservação da massa:} \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (4.14)$$

$$\text{Quantidade de movimento:} \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{U}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{U}_i \bar{U}_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (4.15)$$

A variação da quantidade de movimento média do fluido é representada pelos parâmetros do lado esquerdo da equação 4.15, que é afetado por vários tipos de forças, pela variação de pressão, variação de tensões viscosas e ainda pelas variações de tensão aparente ($-\rho \overline{u'_i u'_j}$) devido ao campo de velocidade flutuante, geralmente referidas como as tensões de *Reynolds* [29]. Ao procurar-se definir a equação de *Navier-Stokes* para o escoamento médio introduziram-se novas incógnitas (as tensões de *Reynolds*) num sistema anteriormente determinado (ver equação 4.3), sem introdução de novas equações [26].

Os modelos baseados nas RANS não resolvem todas as escalas de turbulência. Normalmente, todas as escalas são modeladas como uma única, média, que é representativa de toda a turbulência. O objetivo dos modelos passa por calcular as tensões de *Reynolds*, a partir das equações RANS. Existem várias classificações de modelos quanto ao modo como obtêm as tensões de *Reynolds*. Não tem interesse especificar todos, mas sim realçar que os mais utilizados hoje em dia são os modelos lineares de viscosidade turbulenta de duas equações [25].

Nestes modelos, resolvem-se as equações de transporte da quantidade de movimento, da energia cinética de turbulência e da dissipação de energia cinética de turbulência (modelo *k-ε*) ou da

dissipação específica (modelo $k-\omega$). Nestes modelos, as tensões de *Reynolds* são obtidas da seguinte forma [29]:

$$(-\rho \overline{u'_i u'_j}) = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}, \quad (4.16)$$

onde S_{ij} é o tensor de deformações e δ_{ij} é o delta de *Kronecker*. Os vários modelos de duas equações têm como objetivo determinar esta viscosidade turbulenta μ_t e diferem precisamente na forma de o alcançar.

4.4.1.1 Modelo *standard k-ε*

Inicialmente proposto por *Brian Launder* e *Dudley Spalding*, em 1972 [34], trata-se de um dos mais simples e populares modelos de turbulência. O *standard k-ε* é um modelo semi-empírico, que se baseia no modelo de duas equações: a de transporte para a energia cinética de turbulência (equação 4.8) e a da taxa de dissipação (equação 4.9). Resolvendo as duas equações de transporte adicionais, consegue-se representar as propriedades turbulentas do escoamento e, com isso, determinar a viscosidade turbulenta, que, neste modelo, é dada pela equação 4.11 [29]:

Este modelo só é válido para escoamentos completamente turbulentos, onde os efeitos viscosos moleculares podem ser minimizados, face ao movimento turbulento [34]. No geral, este modelo apresenta um bom rendimento em termos de aproximação e constituição. No entanto, há algumas aplicações para as quais esse modelo não é indicado, entre elas, escoamentos com separação da camada limite, com mudanças súbitas nas taxas de estrangulamento, em fluidos rotativos ou em superfícies curvas [32].

4.4.1.2 Modelo *k-ω*

O modelo *k-ω* surgiu a partir de um outro, proposto em 1942, por *Kolmogorov* [36], que incluía uma equação diferencial para k e uma segunda para ω , sendo que ω era definida como a dissipação de energia por unidade de volume e tempo. Mais tarde, em 1970, *Saffman* [37] formulou um novo modelo *k-ω*, que, desde então, tem vindo a sofrer alguns ajustamentos e melhorias. O parâmetro ω pode ser considerado uma frequência característica do processo de decaimento da turbulência. A versão apresentada por *Saffman* e *Wilcox* [38], em 1988, substitui a taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta por $\omega = \varepsilon/k$, em que se supõe que a viscosidade turbulenta está associada à energia cinética turbulenta, k , e à taxa de dissipação específica, ω , através da seguinte relação [40]:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (4.18)$$

O modelo *k-ω* efetua um tratamento próximo à parede para simulações a baixos números de *Reynolds*, sendo, consequentemente, mais exato e mais robusto que o *standard k-ε*. No entanto, possui deficiências em regiões longe da parede. Para colmatar esta lacuna, é necessário usar uma combinação das equações do modelo *k-ω* próxima das regiões da parede e do modelo *k-ε* na região longe da parede [28]. Isto conduziu *Menter* [40] a formular o modelo de turbulência *Shear-Stress Transport* (SST), abordado de seguida.

4.3.1.3 Shear Stress Transport $\kappa\omega$

O *Shear-Stress Transport* (SST) $\kappa\omega$ foi desenvolvido por *Menter*, em 1994 [40]. Este instrumento de cálculo não representa em si um novo modelo de turbulência, mas a composição de outros dois: o $\kappa\omega$ e o $\kappa\epsilon$. Assim, esta formulação possui dois conjuntos de equações de transporte. O primeiro, $\kappa\omega$, é utilizado na região próxima da parede, enquanto o segundo, $\kappa\epsilon$, é utilizado na região externa do escoamento [41].

Esta formulação matemática consegue prever com boa aproximação o começo e o tamanho de separação de escoamento sob gradientes de pressão em condições adversas, a partir da inclusão de efeitos de transporte na formulação do modelo de viscosidade turbulenta. O modelo SST foi desenvolvido para superar deficiências nos modelos da família $\kappa\omega$. Portanto, o uso do modelo SST sobre esses últimos é recomendado. Na formulação $\kappa\omega$, o tratamento efetuado perto da parede para computações com baixo número de *Reynolds* é mais aprimorado e mais consistente em termos numéricos [32].

4.4.2 LES – LARGE EDDY SIMULATION

Em 1963, Joseph Smagorinsky introduziu este modelo, baseado nas equações de *Navier-Stokes*, quando realizava estudos sobre correntes atmosféricas [45]. Na altura, pretendia simular apenas as grandes escalas atmosféricas, na impossibilidade de o fazer com todo o espectro. A metodologia LES parte do princípio de que os movimentos nas menores escalas tendem a ser mais homogêneos e isotrópicos, logo, menos afetadas pelas condições de contorno como acontece com as escalas maiores. Isto faz com que a modelação dessas escalas seja de carácter universal e constante em condições locais, constituindo uma grande vantagem [43].

Em engenharia, as primeiras aplicações baseadas neste método foram realizadas por Deardoff, em 1970 [47]. Nos últimos anos, o método LES tem conhecido um notório aumento de popularidade e impôs-se como uma técnica fidedigna para a previsão de escoamentos turbulentos, através do desenvolvimento da classe dos modelos dinâmicos de tensões residuais [25].

Relativamente ao DNS, este modelo tem a vantagem de dispor de aplicabilidade a maiores números de *Reynolds* [42], já que resolve as equações completas de *Navier-Stokes* apenas para as escalas maiores (as mais energéticas), deixando as menores serem parametrizadas pela incorporação de um modelo submalha [47]. O LES não necessita de recursos computacionais tão robustos como o DNS, porque é anulada a necessidade de resolver os vórtices menores do campo de escoamento, mas pode apesar de tudo exigir recursos significativos, dependendo da percentagem de energia cinética da turbulência que é resolvida [29].

Como desvantagem, pode apontar-se a exigência de uma malha mais fina e de grande resolução nas proximidades de paredes. As tensões de corte de *Reynolds*, que estabelecem as velocidades médias, são determinadas pelas grandes escalas turbulentas. As simulações devem ser conduzidas de modo a que o maior contributo para as tensões de corte seja dos vórtices resolvidos, implicando isto que o filtro não deverá ser mais largo que uma pequena fração fixa da escala turbilhonar integral local. À medida que a parede se aproxima, a escala integral diminui e, com ela, a largura do filtro [47].

4.4.3 DNS – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DIRETA

O método DNS fundamenta-se na resolução das equações de *Navier-Stokes* sem recurso a médias ou outras aproximações que não sejam as resultantes da discretização numérica, cujo erro pode ser estimado e controlado. As equações governativas são resolvidas numericamente, sem qualquer modelo de turbulência. Isso significa que toda a gama de escalas temporais e espaciais da turbulência devem ser resolvidas [29], ou seja, todos os movimentos contidos no escoamento são resolvidos, o que as torna muito demoradas e dispendiosas [42].

Numa Simulação Numérica Direta, de modo a assegurar que todas as estruturas sindicantes da turbulência sejam captadas, o domínio computacional deve ser maior que o maior vórtice. Uma simulação válida deve também ser capaz de resolver toda a dissipação de energia cinética. Os escoamentos turbulentos apresentam um largo espectro de energia, o que faz com que seja muito difícil simular todas as escalas que o caracterizam, tornando a DNS aplicável apenas em casos com números de *Reynolds* moderados, o que não acontece na maioria dos escoamentos [44].

4.5 MÉTODOS PARA DISCRETIZAÇÃO NO ESPAÇO

O princípio da continuidade admite que a matéria é um meio contínuo, sem vazios interiores, desconsiderando a sua estrutura molecular [46]. O conceito de *continuum* permite representar o ponto geométrico (de volume igual a zero) por um limite matemático, tal como na definição de derivadas no cálculo infinitesimal. Assim, os efeitos da constituição interna molecular dos materiais são levados em conta de forma macroscópica, por intermédio das equações constitutivas do material – neste caso, a água [46].

Depois de selecionado o método de resolução numérica (já introduzido no capítulo anterior) é necessário adotar também um método de discretização espacial apropriado, isto é, uma ferramenta que possibilita aproximar as equações governativas por um sistema de equações algébricas para as variáveis do problema que serão obtidas em localizações discretas no espaço e no tempo [41].

Existem vários métodos numéricos de resolução das equações governativas. Os mais populares são [25]:

- Método dos Elementos Finitos;
- **Método dos Volumes Finitos;**
- Método das Diferenças Finitas;
- Método dos Elementos Fronteira.

Em teoria, se a malha utilizada for suficientemente boa, o resultado obtido através destes métodos será o mesmo, embora alguns deles sejam mais apropriados para determinados tipos de problemas que outros, facto que é tido em conta no procedimento numérico do caso em estudo [46].

O *software* no qual se realizam as simulações desta dissertação utiliza o Método dos Volumes Finitos, uma técnica frequentemente utilizada nesta área [29], motivo pelo qual é abordada no seguinte capítulo.

4.5.1 MVF – MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

No Método dos Volumes Finitos, a variável de interesse está alojada no centroide do volume de controlo. O volume de controlo (VC) é o elemento da malha em que se transformou o domínio da

solução, à qual se aplica o conceito da continuidade [46]. O MVF integra a forma diferencial das equações governativas ao longo de cada VC, aplicando o Teorema de Gauss. Com a equação daí decorrente, este método determina as derivadas e os fluxos, através de formas de interpolação entre o centroide do VC e os nós vizinhos (figura 4.3). Em última análise, este processo resulta na denominada equação de discretização, que expressa a lei governativa para a variável dentro de cada volume de controlo, permitindo chegar à solução global [49].

O MVF pode ser usado em qualquer tipo de malha, fazendo com que seja aplicável a geometrias mais complexas. Uma vez que todos os termos utilizados no MVF têm um significado físico, este modelo de resolução torna-se de compreensão simples e talvez seja por isso que é popular entre engenheiros [46].

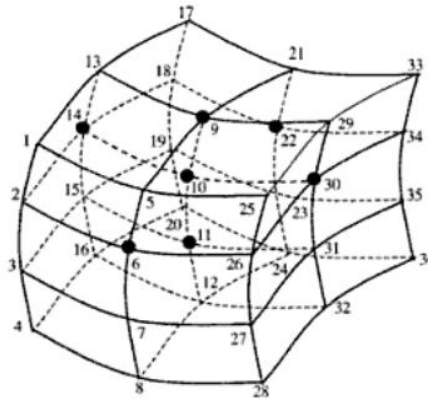


Fig. 4.3 – Esquematisação de volume finito tridimensional [25]

4.6 MALHAS

Uma malha computacional é a representação do modelo físico por meio de linhas e pontos. Quanto mais fina for a malha, menos erros numéricos. Para escoamentos turbulentos, a imprecisão é acrescida, devido a um maior número de equações, logo, para estes casos, deve ser-se mais exigente com a malha a adotar [26]. Os tipos de malhas podem ser agrupados do seguinte modo:

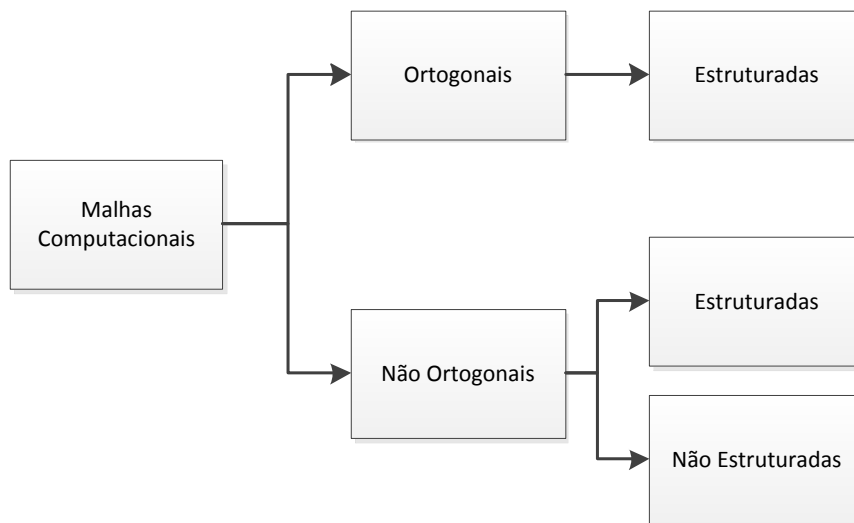


Fig. 4.4 – Tipos de malhas [25] (adaptado)

Como pode ver-se pelas figuras 4.5 e 4.6, a malha não ortogonal adapta-se melhor ao pilar, levando assim a maior precisão nos cálculos. Uma malha estruturada é caracterizada por cada volume interno ter o mesmo número de vizinhos e existir uma sequência natural dos mesmos [47]. A desvantagem das malhas estruturadas reside no facto de poderem ser aplicadas apenas em domínios com geometrias de complexidade média. Outra desvantagem está relacionada com a dificuldade na distribuição dos pontos da malha: uma concentração de células numa região da malha, por razões de precisão de cálculo implica necessariamente menor espaçamento em outras regiões do domínio e o consequente desperdício de recursos. Esta questão é ainda mais grave em problemas modelados tridimensionalmente [46], como é o presente caso. A grande vantagem das malhas estruturadas reside no facto de a alocação de recursos (memória RAM) para definição dos volumes da malha ser menor, em virtude da distribuição ordenada dos mesmos.

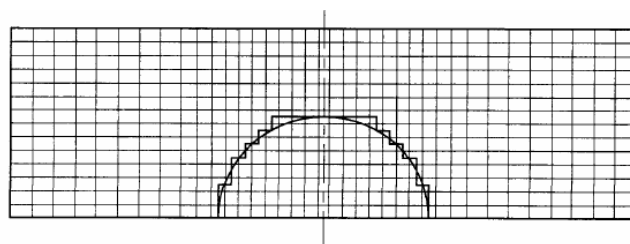


Fig. 4.5 – Exemplo de malha ortogonal [46]

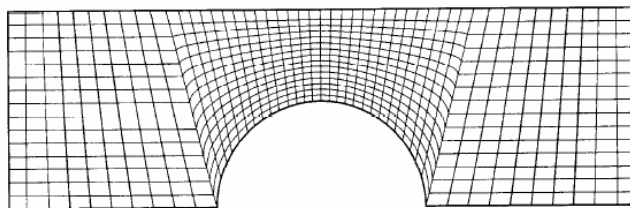


Fig. 4.6 – Exemplo de malha não ortogonal [46]

Para geometrias muito complexas, convém usar um tipo de malha mais flexível, capaz de adaptar-se sem quaisquer limitações à fronteira do domínio de solução. Este tipo de malha é designado por malha não estruturada e encontra-se esquematizada na figura 4.7 [46].

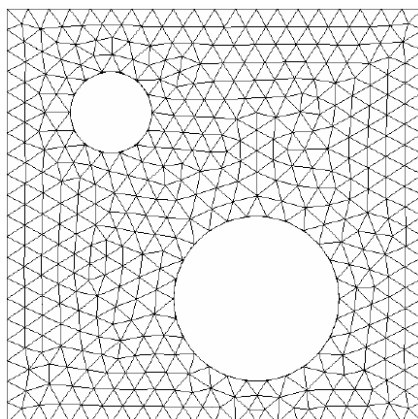


Fig. 4.7 – Exemplo de malha não estruturada [46]

As malhas não estruturadas são mais adequadas quando se usa métodos como o dos elementos finitos ou o dos volumes finitos, tal como acontece nesta dissertação. Os elementos ou volumes de controlo podem ter qualquer forma e não há qualquer restrição ao número de elementos vizinhos ou vértices. A vantagem da flexibilidade é compensada pela desvantagem da irregularidade da estrutura dos dados e pelo aumento de complexidade e formulação. Os algoritmos que resolvem os sistemas de equações algébricas neste tipo de malha são necessariamente mais lentos que os algoritmos para malhas estruturadas [46].

Os códigos computacionais para malhas não estruturadas são mais flexíveis, logo não necessitam de ser alterados em zonas onde é necessário refinar a malha ou quando elementos ou volumes de controlo de diferentes formas são usados [46]. Perante isto, a malha mais indicada para o problema em estudo será do tipo não ortogonal e não estruturada, já que traduz maior precisão, apesar de maior lentidão nos cálculos.

Para finalizar este capítulo, é adequado relembrar os passos mais importantes a efetuar na modelação numérica de um fenómeno. No esquema da figura 4.8, encontra-se sumariado o processo que leva à resolução de um problema, por intermédio da sua simulação numérica.

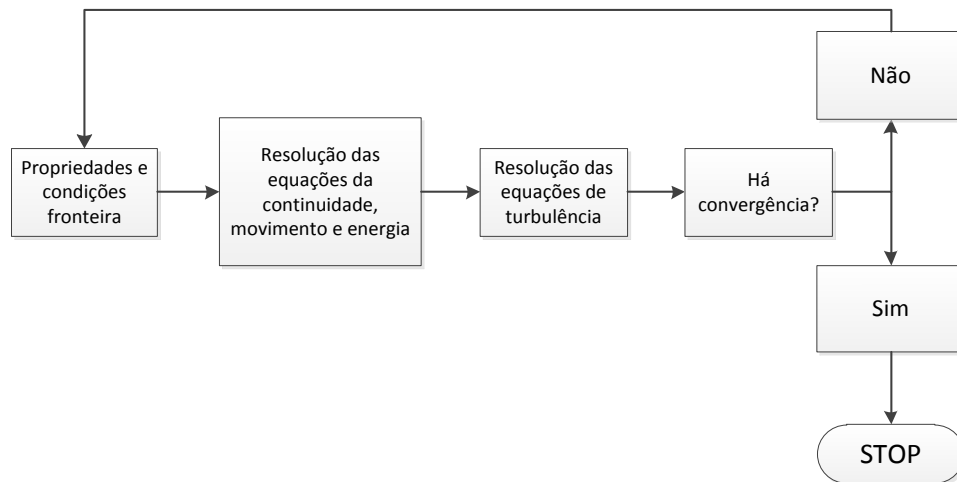


Fig. 4.8 – Esquematização dos passos para a modelação numérica [25] (adaptado)

5

PROCEDIMENTO NUMÉRICO

5.1 PROCEDIMENTO GERAL E SOFTWARE UTILIZADO

De modo a avaliar as estruturas tridimensionais que se formam em torno do pilar, potencialmente responsáveis pelo processo erosivo, a modelação numérica será em 3D. Este tipo de estudos tem merecido uma crescente atenção, devido, em parte, ao considerável desenvolvimento computacional registado nos últimos anos. Contudo, ainda não é possível a correta e completa simulação do fenómeno, porque existem propriedades do escoamento, como a elevada complexidade do padrão de velocidades, que os métodos computacionais não são ainda capazes de simular com rigor [25].

Como previamente mencionado, para caracterizar os mecanismos responsáveis pelo início da erosão e formação da cavidade, a primeira fase de simulações debruçar-se-á sobre o escoamento no fundo sem qualquer erosão, correspondendo à configuração A. Depois de realizado o ensaio laboratorial, modela-se o escoamento sob a chamada configuração B, construída com base nos dados geométricos da cavidade de erosão e eventual assoreamento de sedimentos, registados no canal do laboratório. Para ambas as situações, o procedimento a efetuar é sintetizado nos seguintes passos [25]:

1. Criação da geometria do problema;
2. Geração da malha;
3. Escolha do modelo de turbulência do escoamento;
4. Aplicação das condições-fronteira;
5. Escolha do método de solução;
6. Execução do cálculo numérico;
7. Análise dos dados obtidos.

Numa primeira fase, o problema físico é definido num modelo geométrico. De seguida, o seu domínio computacional é dividido num número de elementos infinitesimais que constituem a malha. Posteriormente, são definidas as propriedades dos fluidos e condições-fronteira. Esta fase é crucial na precisão do resultado final, que depende do tipo de malha e do número de elementos, entre outros fatores. Quanto maior o número de elementos, maior a precisão, com a desvantagem de aumentar o esforço e tempo computacional. Será objetivo primordial chegar a um ponto de equilíbrio entre tempo de cálculo e qualidade da simulação.

Posto isto, o *software* cria o algoritmo numérico (núcleo do código CFD) acompanhando o seguinte processo [35]:

- Modelação das variáveis do escoamento num sistema de equações analíticas simples;
- Discretização das equações fundamentais substituindo-as pelas equações referidas anteriormente;
- Resolução do sistema de equações algébricas.

Numa fase final, de pós-processamento, estuda-se a solução dada pelo *software* de cálculo, comparando resultados com os dados sugeridos pela bibliografia.

O computador utilizado possui um processador Intel Core i3 @ 2.20GHz com 4Gb de RAM, com capacidade para armazenar 200 GB de dados. A modelação de escoamentos turbulentos requer máquinas potentes, fator acentuado quando se trata de uma simulação tridimensional, como é o caso. Simulações de 20 segundos de escoamento exigem tempos de processamentos de dados acima de 70 horas, com o equipamento acima descrito. A máquina atrás descrita cumpre razoavelmente os requisitos exigidos por trabalhos deste tipo, embora o limite de armazenamento tenha sido, por vezes, um problema.

Com vista a cumprir as tarefas acima descritas, foi preferido o grupo de programas informáticos ANSYS, uma aplicação comercial utilizada nos mais diversos ramos da engenharia e ciência, que detém um conjunto de ferramentas especialmente desenhadas para satisfazer as exigências impostas pelo processo que leva à modelação numérica do escoamento.

A plataforma de trabalho *ANSYS Workbench* permite elaborar um projeto que associa um ficheiro a cada um dos sete passos enumerados anteriormente. Como se pode verificar pela figura 5.1, o *software* sugere por si só uma sequência análoga à descrita anteriormente. Cada partição leva a um programa dedicado a uma tarefa específica e o ANSYS trata de correlacionar todos os ficheiros e garantir a compatibilidade entre eles [49].

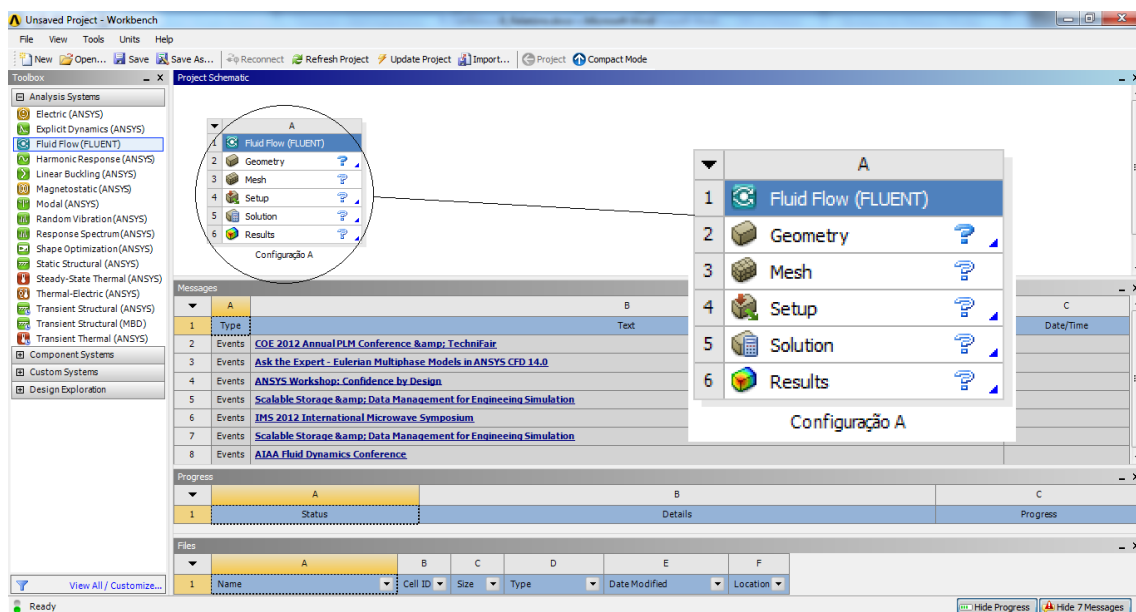


Fig. 5.1– ANSYS Workbench

5.2 CONFIGURAÇÃO A

Como anteriormente referido, a configuração A do problema corresponde a um fundo plano, sem qualquer erosão, representando o instante que antecede o início do processo erosivo.

5.2.1 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA

Para esta etapa, será utilizado o *ANSYS Design Modeler*, uma ferramenta de desenho assistido por computador. A configuração A, correspondente a um estado inicial ainda sem erosão, consiste num paralelepípedo representativo da lâmina da água delimitada pelas paredes do canal, com um orifício de 50 mm de diâmetro, que reproduz o pilar (figura 5.2).

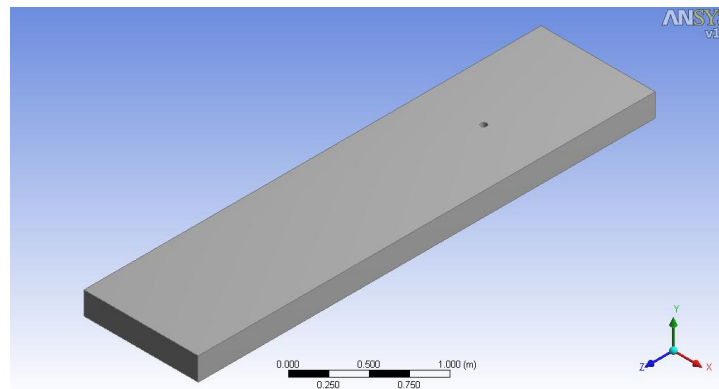


Fig. 5.2 – Geometria da configuração A

Dadas as dimensões do canal onde decorreu ensaio, o referido paralelepípedo terá 1 m de largura, 4 m de desenvolvimento (ligeiramente maior que a caixa de sedimentos) e 0,20 metros de altura, que é a altura da lâmina de água.

5.2.2. GERAÇÃO DA MALHA

Há vários métodos para gerar malhas computacionais, como, por exemplo, desenhar a malha manualmente e depois introduzir as coordenadas dos pontos num *software* apropriado para o efeito [6]. Dadas as dimensões do canal, esta hipótese foi afastada, pois o número de elementos é enorme, tornando esse procedimento impraticável. Assim, optou-se por gerar uma malha automática, através da ferramenta *ANSYS Meshing*. Como será exposto oportunamente, a ferramenta de cálculo do ANSYS – o *Fluent* – baseia-se no método dos volumes finitos [35]. Com isto e de acordo com o que já foi dito no capítulo 4, a malha a ser utilizada deverá ser do tipo não estruturado.

Dados os condicionais impostos pelos recursos informáticos disponíveis, importa rentabilizar tempo de processamento. Para isso, e de modo a não sacrificar a qualidade dos resultados, deve-se refinar a malha nas zonas que nos interessam ter mais e melhores resultados e não ser tão exigente com outras zonas. Neste estudo, é fulcral ter precisão na zona do pilar e em torno deste. É ali que se forma a cavidade de erosão. A isto, acresce a necessidade de refinar também o fundo e paredes do canal, pois é uma das condições de um dos modelos de turbulência a utilizar, o *Large Eddy Simulation*, tal como foi referido no capítulo 4. Para refinar a malha foram usadas ferramentas especiais do *ANSYS Meshing*. Inicialmente, definiu-se o tamanho tipo de cada elemento, arbitrando valores mínimos e máximos para cada um, como se pode ver na figura 5.3

Sizing	
Use Advanced Si...	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Norma...	Default (18,0 °)
Proximity Accuracy	0,5
Num Cells Across...	Default (3)
Min Size	Default (1,0288e-003 m)
Max Face Size	Default (0,102880 m)
Max Tet Size	Default (0,205750 m)
Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge L...	0,157080 m
Inflation	
Advanced	
Pinch	
Statistics	

Fig. 5.3 – Menu *Sizing* do ANSYS Meshing

Para o refinamento da malha nas paredes e fundo foram utilizados os comandos *Face Sizing* e *Inflation* que permite efeitos de degradação da malha, como se observa na figura 5.4. Como se pode observar, obtiveram-se elementos muito mais pequenos junto às paredes e fundo, aumentando de tamanho à medida que se aproxima da superfície e do centro. Desta forma, os elementos mais pequenos localizam-se junto das fronteiras sólidas, onde se verificam os gradientes de velocidade mais elevados. Nas regiões mais afastadas das fronteiras, onde os gradientes de velocidade são menores, os volumes finitos podem ser maiores. Isto permite obter maior precisão onde queremos, sem sobrecarregar o *software* com uma malha muito refinada ao longo de toda a geometria.

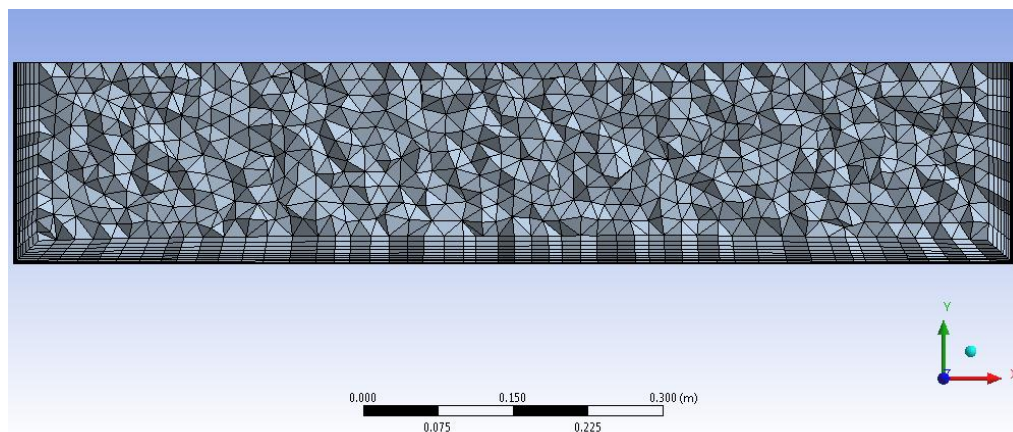


Fig. 5.4 – Refinamento da malha (perto da zona de saída)

Para a secção em torno do pilar usou-se uma técnica bastante divulgada pelos autores do tema: o *Body Sizing*. Este método consiste em definir um corpo que interceta a zona que nos interessa refinar e, nessa interseção, definir o tamanho dos elementos. O *software* utilizado permite definir uma esfera, de raio r , com elementos de volume v , centrada no ponto (x,y,z) . Esta ferramenta denomina-se por esfera de influência e foi aplicada em torno do pilar (figura 5.5) e mais a jusante, de modo a ter precisão na zona onde se propagam os vórtices de esteira.

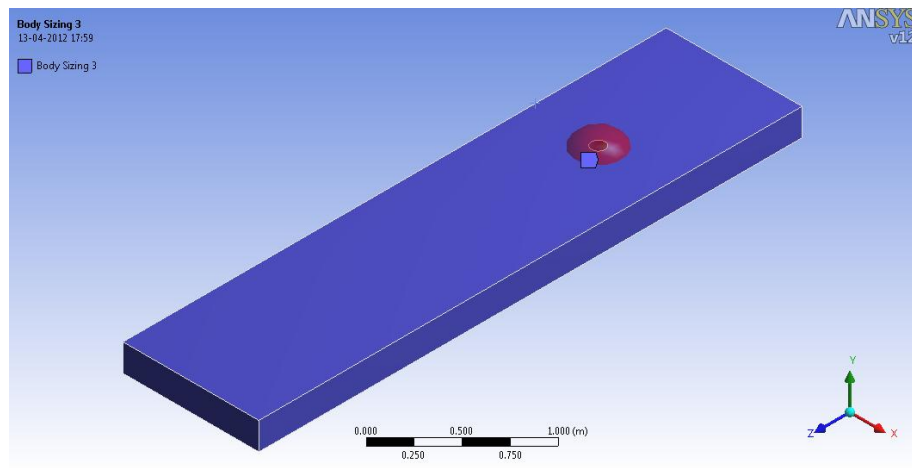


Fig. 5.5 – Esfera de Influência em torno do pilar

Durante a construção da malha, o *software* permite fazer um “corte” no volume, para verificar a construção interior da malha. Na figura 5.6, representa-se um desses “cortes” que passa no pilar. Note-se nos elementos finíssimos em torno do pilar. Alguns deles têm arestas de dimensão inferior a 1 mm, o que se vai repercutir positivamente na precisão de certos resultados, como valores das forças e pressões no pilar, assim como tensões de arrastamento no fundo do canal.

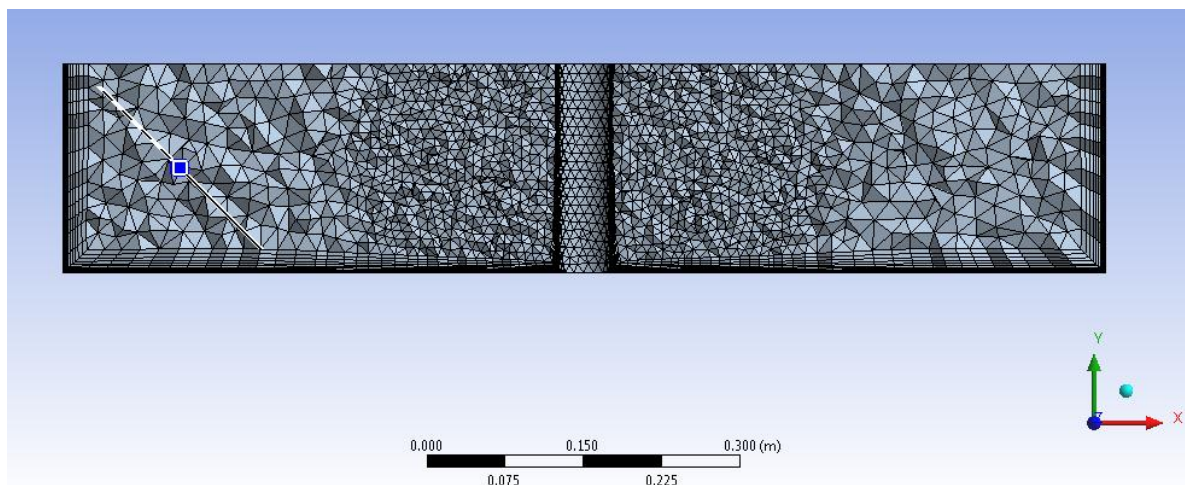


Fig. 5.6 – Pormenor da malha em torno do pilar

O *ANSYS Meshing* permite ainda obter um relatório de qualidade da malha, onde tem informação, como a que de seguida se apresenta:

- Volume do menor elemento (m^3): 2.441876×10^{-9} ;
- Volume maior elemento (m^3): 2.877290×10^{-5} ;
- Volume total (m^3): 0.7996145.

A malha utilizada para a configuração A possui um total de 1307529 elementos. A vista global da malha (figura 5.7) permite ver partes mais ou menos refinadas, percebendo-se claramente o zonamento efetuado.

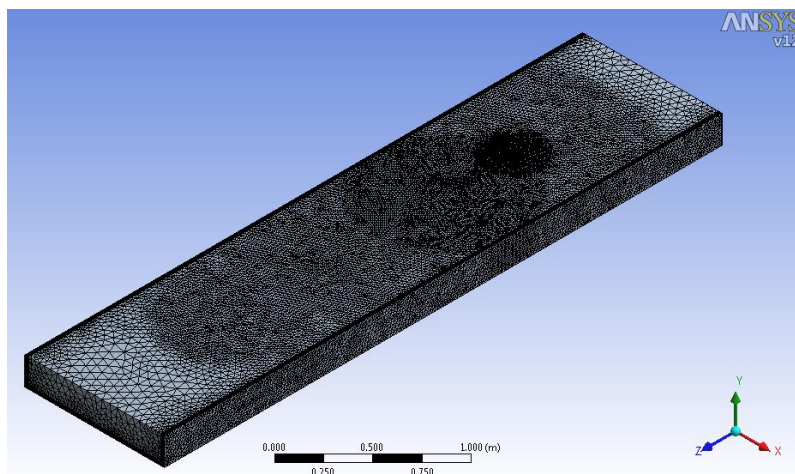


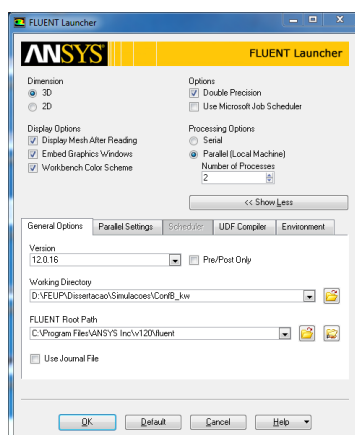
Fig. 5.7 – Perspetiva geral da malha

5.2.3 CÁLCULO

Como antes supracitado, a resolução numérica do problema foi executada no *Fluent*, um *software* empregado na simulação diversos tipos de escoamentos, através do qual pode-se definir as condições-fronteira, materiais, modelos de turbulência, métodos de solução, etc. Esta ferramenta resolve o sistema de equações resultante dos parâmetros introduzidos, permitindo, ainda, analisar os resultados alcançados. Para essa análise, o utilizador dispõe de um vasto leque de soluções gráficas como imagens, vídeos, histogramas e relatórios. Todas estas funcionalidades serão oportunamente exploradas neste trabalho.

5.2.3.1 Opções de processamento

Dadas as exigências relativas à capacidade de cálculo para a resolução deste tipo de problemas, é elementar tirar partido da máxima capacidade dos processadores do computador, sendo necessário, para isso, realizar os cálculos paralelamente, tirando partido da tecnologia *Multi Core*, que permite usar dois ou mais processadores do computador (os *cores*) em simultâneo, possibilitando a execução do dobro de cálculos por segundo [48]. Para isso, seleccionou-se a opção *Parallel Processing* no menu *Fluent Launcher* (figura 5.8).

Fig. 5.8 – *Fluent Launcher*

5.2.3.2 Opções Gerais

No menu geral (figura 5.9), são configuradas opções básicas, como a escala da geometria, verificação da qualidade da malha e o tipo de método de solução. O *Fluent* resolve as equações governativas descritas no capítulo 4, que foram transformadas em equações algébricas pelo método dos volumes finitos. A resolução numérica desse sistema de equações pode ser alcançada de dois modos: resolução baseada na pressão (*pressure-based*) ou baseada na massa volúmica (*density-based*). A primeira é utilizada para escoamentos incompressíveis e pouco compressíveis [5], logo foi essa a eleita. O tipo de escoamento relativamente à sua dependência ao longo do tempo é também configurado neste menu. Na presente dissertação, estuda-se um escoamento transitório, também conhecido por escoamento não permanente, isto é, a pressão e a velocidade num ponto são dependentes tanto das coordenadas como também do tempo [23]. A aceleração da gravidade foi definida com o valor 9.81 m/s^2 e as unidades adotadas são as do S.I.

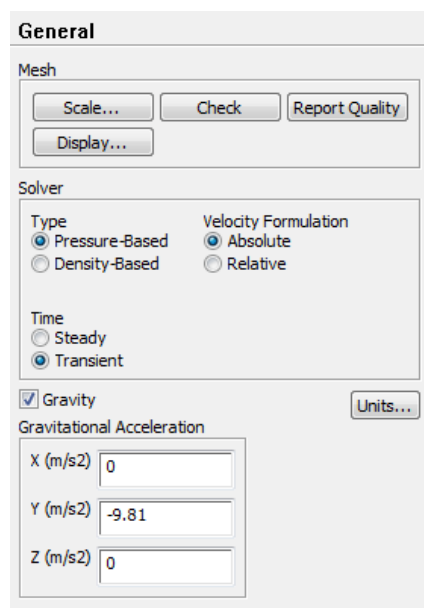


Fig. 5.9 – Menu Geral

5.2.3.3 Modelos numéricos

A escolha dos modelos numéricos, já abordados no capítulo 4 desta dissertação, é uma das fases mais importantes na modelação numérica de escoamentos. O *Fluent* oferece um vasto leque de modelos e submodelos de turbulência (figura 5.10) [35]:

- Modelos $k-\epsilon$
 - Modelo $k-\epsilon$ *Standard*
 - Modelo $k-\epsilon$ *Renormalization* (RNG)
 - Modelo $k-\epsilon$ *Realizable*
- Modelos $k-\omega$
 - Modelo $k-\omega$ *Standard*
 - **Modelo $k-\omega$ *Shear-stress transport* (SST)**

- Modelo de transição SST
- Modelos de tensão de *Reynolds* (RSM)
 - Modelo RSM de pressão linear
 - Modelo RSM de pressão quadrática
 - Modelo RSM de baixo *Reynolds*, *stress-omega*
- **Modelos *Large Eddy Simulation***
 - Modelo WALE
 - Modelo *Smagorinsky Lilly*
 - Modelo *Kinetic-Energy Transport*

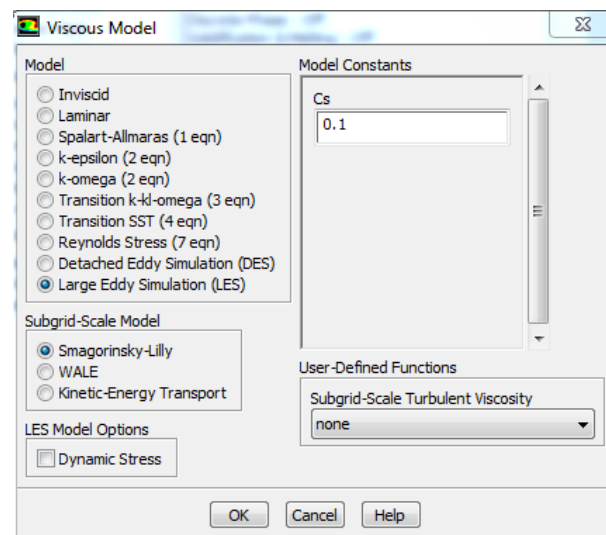


Fig. 5.10 – Escolha do modelo de turbulência

Segundo o exposto no capítulo 4, os métodos mais precisos para a simulação numérica de fluidos são o LES e o DNS. Uma vez que o escoamento é caracterizado por um elevado número de *Reynolds*, a hipótese de usar o modelo DNS é afastada. Portanto, o modelo de turbulência escolhido foi o LES. De modo a averiguar a influência do modelo de resolução numérica no resultado das simulações, foram feitas simulações extra com o modelo *k- ω* .

5.2.3.4 Materiais

Aqui são definidos os materiais que posteriormente são atribuídos a cada componente do modelo. Naturalmente que o fluido é água, o pilar é em PVC, as paredes do canal em acrílico, e o fundo é a areia já descrita anteriormente. O *Fluent* dispõe de uma vasta base de dados com materiais e as correspondentes propriedades predefinidas (figura 5.11).

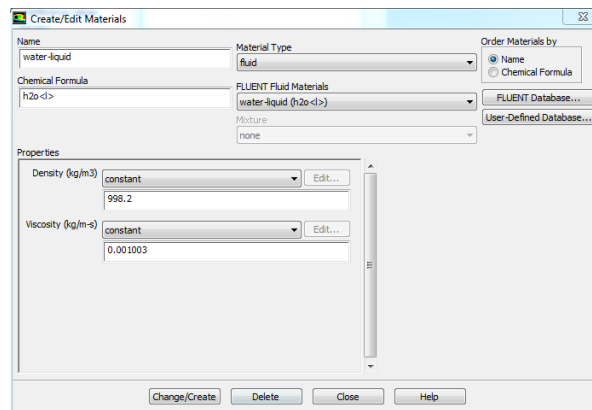


Fig. 5.11 – Definição das propriedades dos materiais

5.2.3.5 Condições-fronteira

Em parte, as condições-fronteira definem o tipo de escoamento que vai ser modelado, que, neste caso, é um escoamento com superfície livre. Para a secção de entrada do canal, utilizou-se uma condição que define o caudal que passa na referida zona (*mass-flow-inlet*), no qual se definiu o seu valor em 64l/s (figura 5.12), de acordo com as condições apresentadas no subcapítulo 3.1.

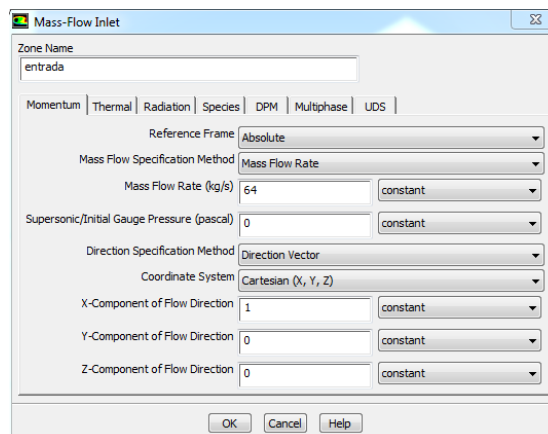


Fig. 5.12 – Caraterização da fronteira da secção de entrada

No pilar, aplicou-se a condição-fronteira de parede (*wall*), que estabelece que todas as componentes de velocidade nessa superfícies são nulas, funcionando assim como um obstáculo. As paredes do canal, são rígidas e impermeáveis e, por isso, são definidas com a mesma condição que o pilar.

Na secção de saída do canal, a condição adotada é a *outflow*, que estabelece a secção como uma abertura, o que faz com que não estejam especificadas, à partida, as condições de saída e essa informação é extrapolada do interior.

O fundo arenoso é a fronteira que sofrerá erosão. Apesar de não corresponder completamente à realidade, considerou-se que esta fronteira é impermeável, portanto a condição a adotar é também a *wall*.

O tratamento da superfície livre como uma fronteira revelou ser um dos maiores desafios desta modelação numérica. Segundo a bibliografia, para escoamentos com superfície livre é normalmente

usado um modelo multifásico, denominado *VOF – Volum of Fluid*. Assim, a simulação incidiria não só no escoamento da água como também na sua interação com o ar, acrescentando as necessidades de capacidade de cálculo e tempo de processamento. Uma vez que para o presente caso, ao contrário de áreas de estudo como, por exemplo, a modelação de ondas, a interação entre o ar e a água não é muito relevante, afastou-se o uso do VOF, usando um método que a seguir se descreve que permitiu poupar significativo tempo de cálculo [30].

Optou-se por definir a superfície livre como uma parede sem qualquer atrito e impôs-se a pressão relativa como nula nessa fronteira, simulando assim uma superfície livre à pressão atmosférica (figura 5.13). Com esta simplificação desprezou-se a deformação da superfície livre o que, para a relação entre a altura do escoamento e o diâmetro utilizados, é adequado. No entanto, este aspeto não constitui qualquer ameaça à precisão dos resultados, já que a principal elevação ocorre imediatamente a montante do pilar e como se pode verificar pela figura 3.23, não atinge dimensões consideráveis ($\approx 2\text{mm}$). Assim, sem prejudicar a qualidade da simulação, poupou-se em tempo de processamento e, consequentemente, as exigências de capacidade de armazenamento disponível em disco são menores.

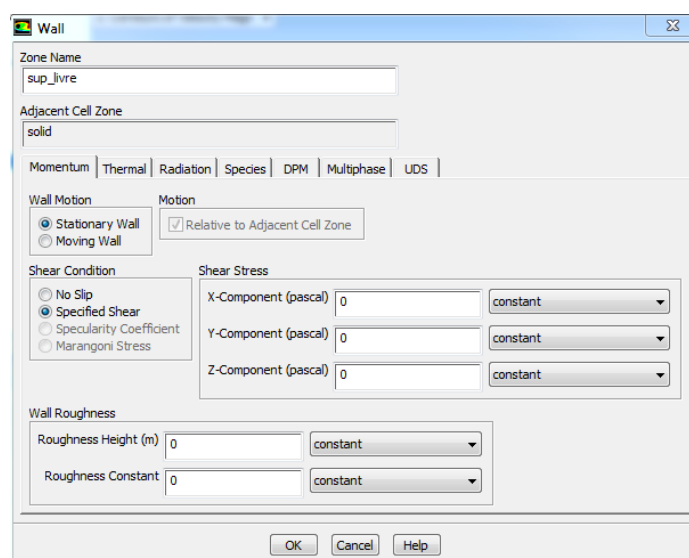


Fig. 5.13 – Definição das características da superfície livre

5.2.3.6 Métodos de Solução

O ANSYS *Fluent* oferece um leque de solucionadores (figura 5.14), modelos de discretização e variáveis que podem afetar a convergência da simulação e o próprio resultado. Este programa está munido de mecanismos que melhoram a convergência da equação da conservação, a saber [5]:

- *SIMPLE*;
- *SIMPLEC*;
- *PISO*.

O primeiro (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) é um algoritmo iterativo em que o campo de pressões é estimado de modo a determinar as componentes da velocidade. A correção de pressão é deduzida das equações quantidade de movimento e de continuidade. Este passo é repetido até a solução convergir [30].

O método *SIMPLEC* (*SIMPLE-Consistent*), difere do *SIMPLE* no modo de cálculo dos fluxos que atravessam uma face da malha. Permite atingir a convergência de modo mais rápido e eficaz que o primeiro. Estes dois esquemas têm uma limitação relacionada com a equação da quantidade de movimento (equação 4.3). Esta não é satisfeita após a resolução da equação da correção de pressão, sendo necessária a repetição dos cálculos até o balanço ser satisfeito [35].

O esquema *PISO* (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) executa dois cálculos adicionais relacionados com a correção de pressão considerando a qualidade de cada elemento de malha. Atinge a convergência de um modo mais rápido e eficaz, reduzindo o tempo de cálculo da solução [30] e, por isso, foi este o método adotado.

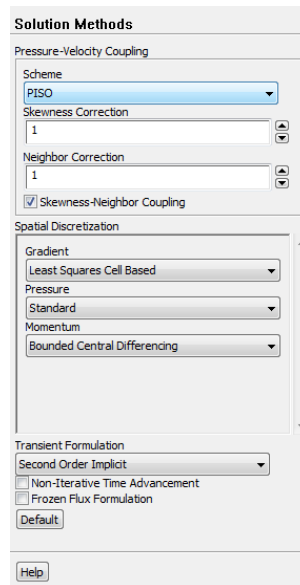


Fig. 5.14 – Escolha do modelo de solução

5.2.3.7 Controlo da solução

O manual do *Fluent* sugere, como critério de convergência, garantir que o valor dos resíduos (parâmetro que traduz a diferença do valor obtido numa iteração e a iteração anterior) ronde os 1×10^{-6} (figura 5.15) [30]. Excepcionalmente, em algumas das simulações, não foi possível reduzir, em tempo útil, os resíduos da equação da continuidade abaixo do limite 1×10^{-3} .

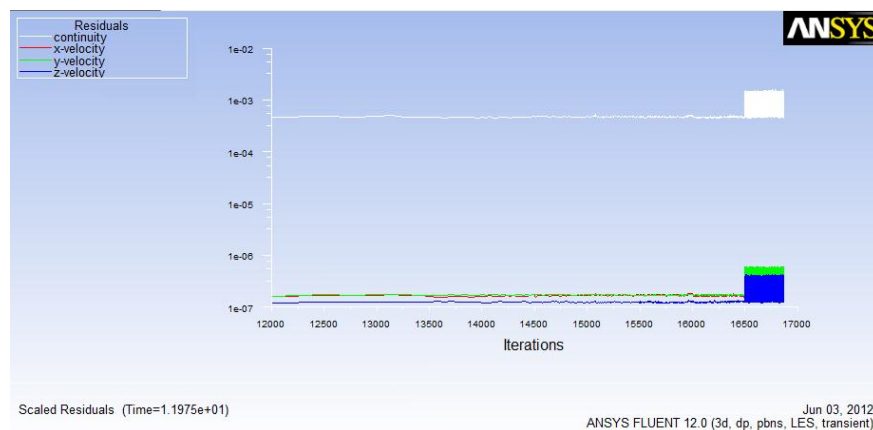


Fig. 5.15-Resíduos ao longo das iterações de uma das simulações realizadas

5.2.3.8 Run Calculation

Na análise por CFD de escoamentos transitórios é necessário fornecer informação, não só relativamente à discretização no espaço, como também no tempo (figura 5.16).

Para este tipo de escoamentos, o tempo de simulação depende de um parâmetro denominado por número de *Courant*, *CFL*, que se refere à relação entre a dimensão do intervalo de tempo da fração de volume calculada, Δt , e as características espaciais de uma dada célula do domínio. Portanto, vem [30]:

$$CFL = \frac{\Delta t}{x_{célula}/V_{fluido}}, \quad (5.1)$$

em que $x_{célula}$ representa a distância de um elemento de fluido percorre através de um volume de controlo à uma velocidade U_{fluido} .

A solução é tanto mais exata quanto menor for o *time-step*, Δt , no entanto, não pode tomar valores muito pequenos, pois atrasaria muito a simulação.

O *software*, já tem o número de *Courant* definido em 0.25. Na malha utilizada, a dimensão média de um VC é 1×10^{-2} m. Para a velocidade média do escoamento de aproximação de 0.32 m/s resulta num *time-step* de 0.007 segundos. Adotando o valor recomendado pelo manual do *software* para o número de iterações por *time-step*, 20, facilmente se conclui que serão necessárias mais de 57 000 iterações para simular 20 segundos de escoamento.

Run Calculation

Check Case... Preview Mesh Motion...

Time Stepping Method: Fixed Time Step Size (s): 0.007

Settings... Number of Time Steps: 70000

Options

☒ Extrapolate Variables

☐ Data Sampling for Time Statistics

Sampling Interval: 1 Sampling Options...

Max Iterations/Time Step: 20 Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

Data File Quantities... Acoustic Signals...

Calculate

Help

Fig. 5.16 – Menu *Run Calculation*

5.3 CONFIGURAÇÃO B

A configuração B corresponde ao escoamento no canal, em que o leito arenoso encontra-se já com a cavidade de erosão completamente desenvolvida. Nesta fase, não há evolução temporal visível da geometria da cavidade.

Para construir um novo modelo geométrico, foi necessário conhecer, com bastante precisão, a geometria da cavidade gerada pelo processo erosivo. Para tal foi realizado o ensaio laboratorial apresentado no capítulo 3. Terminado o ensaio, mediu-se a cavidade de erosão de modo a traduzi-la num modelo tridimensional para simular numericamente o escoamento em torno do pilar, como se fez para a configuração A.

5.3.1 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA E DA MALHA DA CONFIGURAÇÃO B

Uma vez que a geometria da configuração B é mais complexa do que a inicial foi necessário recorrer a um *software* com melhor desempenho que o *Design Modeler*, indicado apenas para geometrias simples. O *SolidWorks*, amplamente utilizado em vários ramos da engenharia, tem um leque vasto de ferramentas que permitem recriar da melhor maneira o modelo, com base nas curvas de nível que se obteve com o ensaio laboratorial (ver capítulo 3), como se pode ver pela figura 5.17.

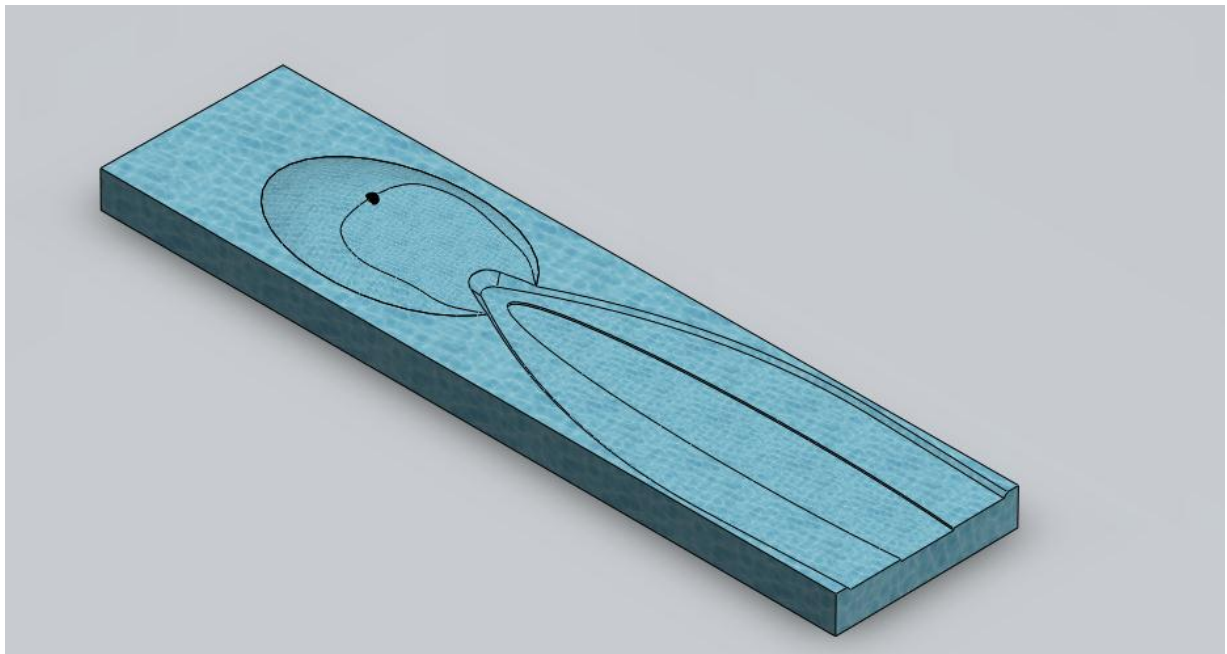


Fig. 5.17 – Modelo geométrico da configuração B (vista do fundo)

As recomendações quanto à qualidade da malha, são as mesmas que as da configuração inicial, o que para esta configuração representou uma dificuldade acrescida. Devido à curvatura da nova geometria em certas zonas, a malha gerada pelo *ANSYS Meshing* continha elementos demasiado esbeltos, o que provoca instabilidades numéricas na modelação do escoamento [30]. Assim, procurou-se simplificar a geometria, respeitando a forma da cavidade de erosão medida em laboratório. A nova malha fica do modo que se ilustra na figura 5.18.

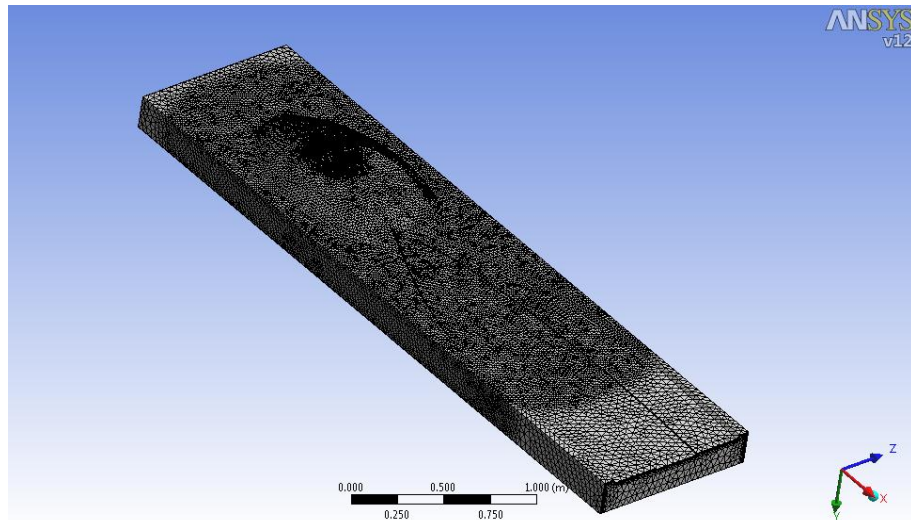


Fig. 5.18 – Malha da configuração B

Para além dos cuidados que se teve com a geometria da configuração A, procurou-se refinar a malha na zona da cavidade de erosão. Na imagem 5.19, pode ver-se o interior do modelo, com elementos muito pequenos na zona do pilar e à medida que se vai para jusante, uma malha menos fina.

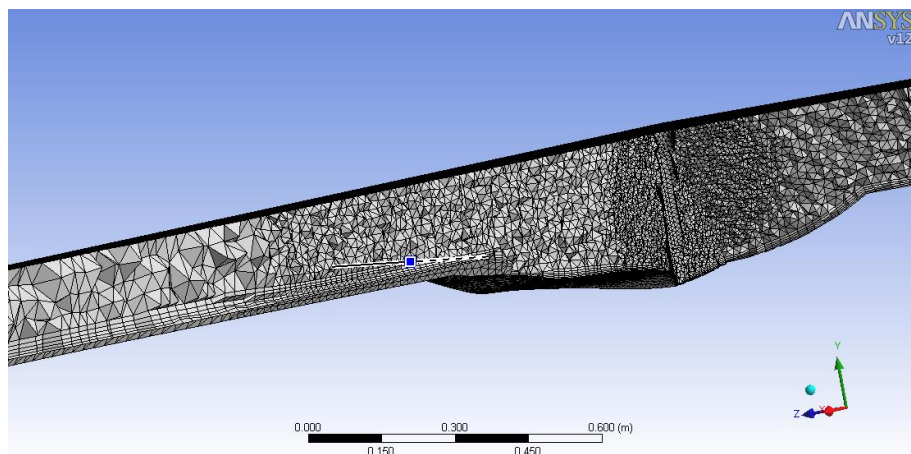


Fig. 5.19 – Pormenor da malha em torno do pilar

Todas as restantes opções são iguais às indicadas para a configuração A. Os resultados das simulações serão analisados e comparados no capítulo 6.

6

RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados das várias simulações numéricas realizadas no âmbito desta dissertação. Para cada uma das duas configurações do fundo do canal ensaiadas, com um pilar de 50 mm de diâmetro, foram realizadas duas simulações que diferem entre si apenas no modelo de turbulência utilizado: numa, o LES, na outra, o SST $k-\omega$. Tal como o modelo $k-\varepsilon$, o modelo $k-\omega$ é um dos modelos de turbulência mais usados na indústria, devido à sua fiabilidade e à sua vasta aplicação, em particular se o principal interesse são os campos de velocidade média. No entanto, não é possível fazer simulações de escoamentos não permanentes, já que o modelo não o permite. O modelo LES, como descrito no subcapítulo 4.4.2, é um modelo que permite a simulação de escoamentos não permanentes, dado que resolve as escalas de turbulência mais pequenas. Numa perspetiva de alargar este estudo, foi ainda efetuada mais uma simulação, com o modelo LES, mas desta feita, com um pilar com o dobro do diâmetro (100 mm), com o fundo na configuração A. Com isto, foi possível avaliar mais detalhadamente a estrutura dos vórtices (já que são de maior dimensão) bem como o eventual papel que terão no processo erosivo. Isto permitiu tirar algumas ilações sobre a influência do diâmetro do pilar no campo de velocidades, nas pressões e nas tensões de arrastamento.

6.1 SIMULAÇÃO Nº 1: CONFIGURAÇÃO A – MODELO LES

Após cerca de 68 horas de processamento de dados, a simulação de 20 segundos de escoamento sob o fundo na configuração A foi dada por terminada. A fim de ter uma perceção da precisão da solução alcançada, observe-se a figura 6.1, onde está exposta a variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo. O critério anteriormente imposto (valor à volta dos 10^{-6}) é cumprido para todos os resíduos, à exceção do valor referente à continuidade. Importa esclarecer que os resultados de seguida analisados são referentes ao instante final do tempo de escoamento simulado.

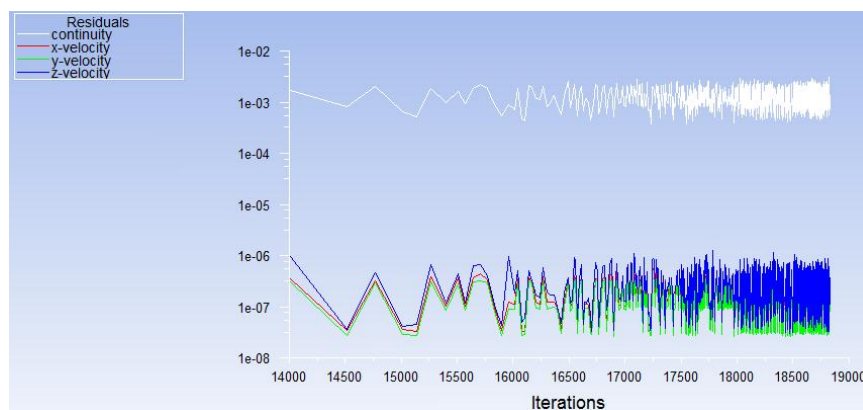


Fig. 6.1 – Variação dos resíduos ao longo das iterações

6.1.1 CAMPO DE VELOCIDADES

As perturbações no campo de velocidades geradas pela presença do pilar no seio do escoamento estão representadas na figura 6.2, através do *contour* da velocidade no plano paralelo ao fundo do canal a uma distância deste de 10 cm, ou seja, o plano médio. É perceptível o desenvolvimento da esteira de vórtices a partir do pilar (círculo branco), bem como o desenvolvimento da camada limite nas paredes laterais. Nas seguintes imagens, salvo indicação por meio de uma seta, o escoamento dá-se da esquerda para a direita.

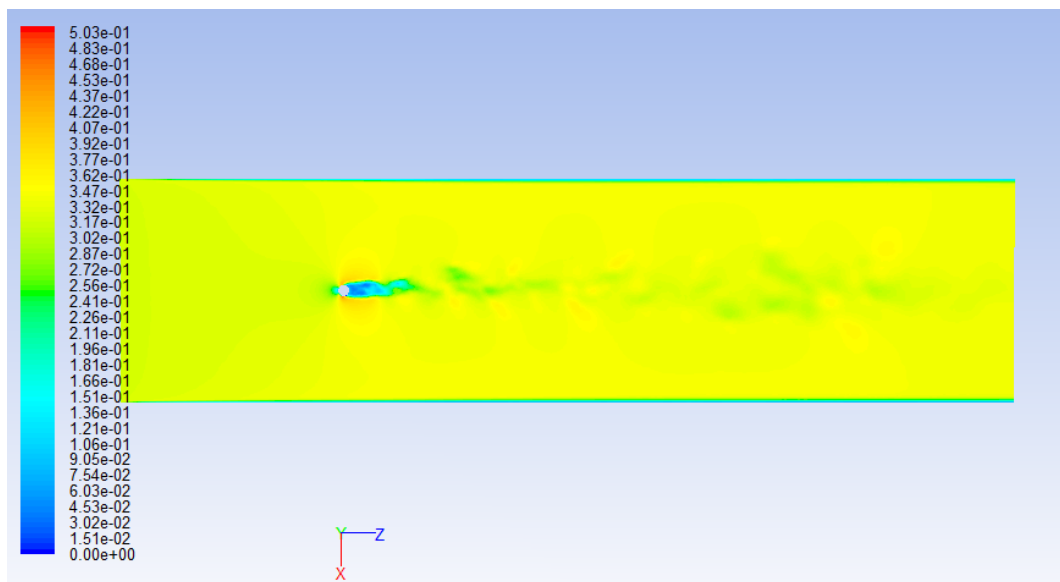


Fig. 6.2 – Campo de velocidades a 0.10 m do fundo do canal

Para melhor observar os padrões de velocidades que estes descrevem, atente-se no *zoom* efetuado na zona dos vórtices de esteira (figura 6.3).

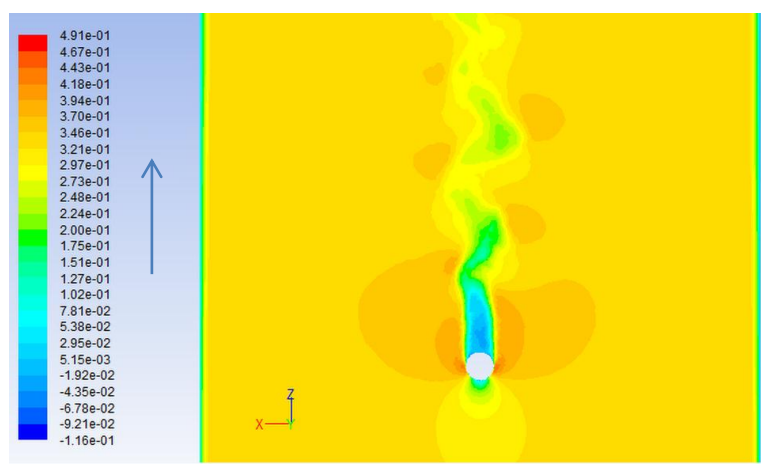


Fig. 6.3 – Velocidades longitudinais na esteira de vórtices a 10 cm do fundo

Junto ao fundo, o padrão das velocidades adquire uma forma que faz prever onde se formará a cavidade de erosão (figura 6.4). A zona a amarelo corresponde ao desenvolvimento dos vórtices em ferradura que têm um papel ativo na erosão. Estas perturbações foram as primeiras a serem assinaláveis no decorrer do tempo de escoamento.

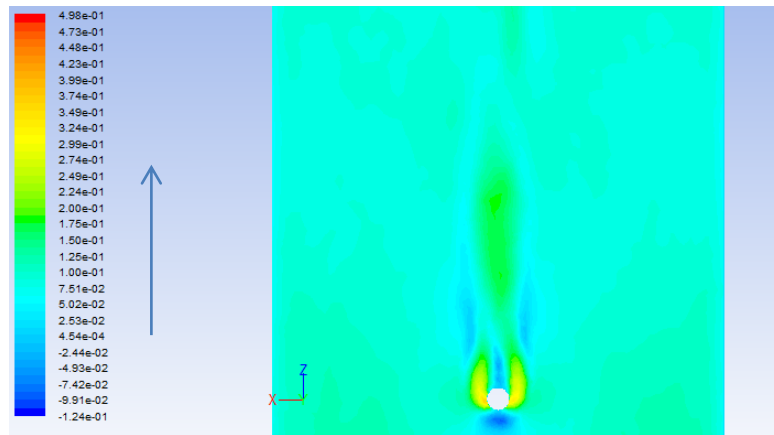


Fig. 6.4 – Velocidade longitudinal a 0.1 cm do fundo do canal

A velocidade diminui na zona imediatamente a jusante do pilar, devido à obstrução por este causada, formando a zona de estagnação. Esta variação de velocidade é maior para o nível da superfície livre e diminui progressivamente à medida que se aproxima do fundo do canal (figura 6.5).

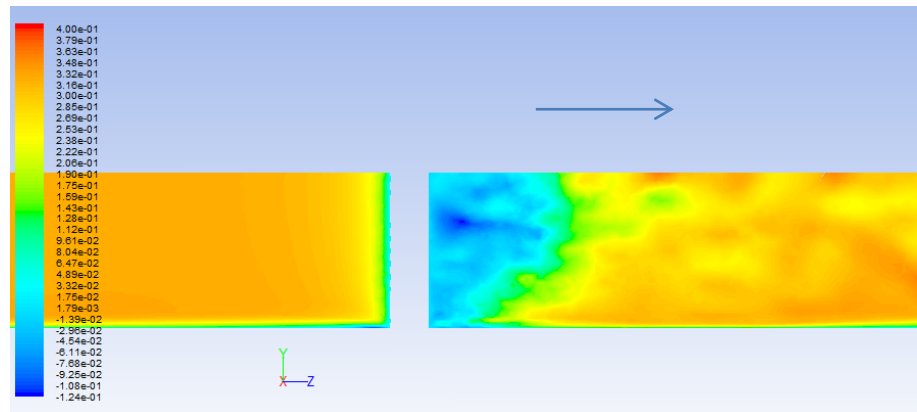


Fig. 6.5 – Velocidade longitudinal no eixo de simetria do canal

A velocidade das partículas do escoamento altera-se devido à perturbação induzida pelo pilar e assume a distribuição ilustrada pela figura 6.6, sendo que 0.32 m/s, o valor da velocidade do escoamento de aproximação, é ainda o valor mais notado, tal como seria de esperar.

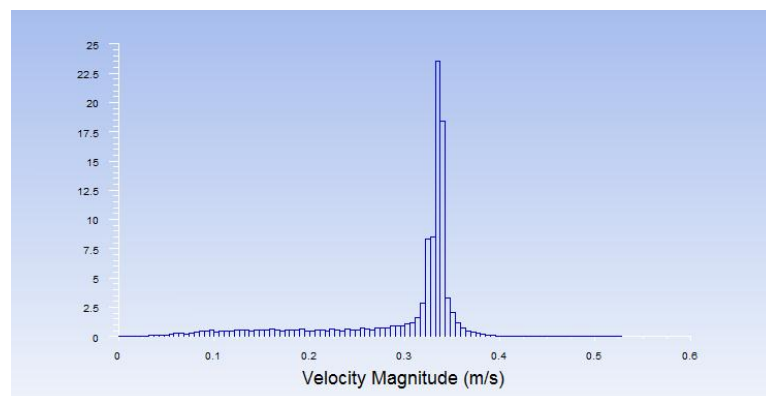


Fig. 6.6 – Distribuição percentual da velocidade das partículas para todo o escoamento, nos 20 segundos simulados

O ensaio laboratorial permitiu assistir visualmente às perturbações que o pilar provoca na superfície livre do escoamento, nomeadamente a superfície de enrolamento e a esteira turbulenta (figuras 3.24 e 3.25). A figura 6.7 expõe as perturbações que essas estruturas provocam no campo de velocidades da superfície livre. O pilar situa-se, como foi visto, na ordenada igual a 1 m, no eixo *Position*.

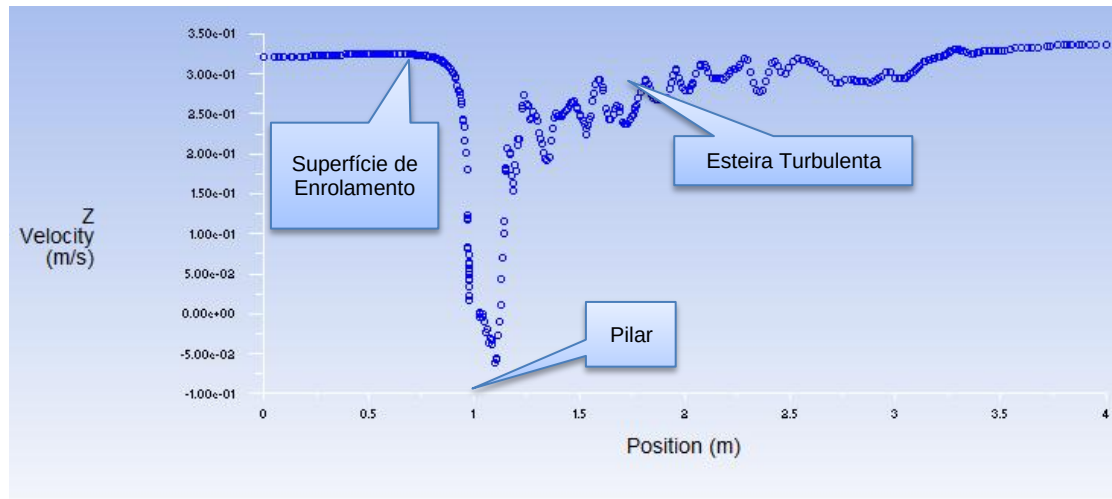


Fig. 6.7 – Velocidade longitudinal na superfície livre ao longo do eixo de simetria do canal

Através da opção *pathlines* é possível traçar um campo de trajetórias de algumas partículas do fluido. Na figura 6.8 são visíveis prenúncios dos movimentos descritos por um vórtice em ferradura, a montante do pilar e junto ao fundo. Recomenda-se a consulta da figura 2.3, de modo a comparar o aspeto gráfico do fenómeno conseguido na simulação e o apresentado pela bibliografia.

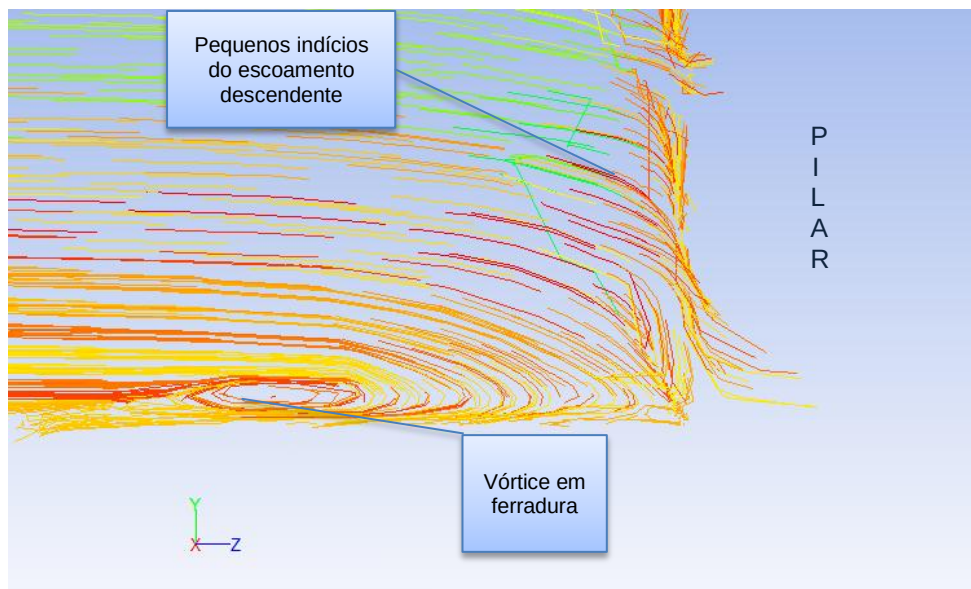


Fig. 6.8 – Pequenos indícios de estruturas que podem provocar escavação

6.1.2 PRESSÕES

As figuras 6.9 e 6.10 representam a distribuição de pressão estática e dinâmica, respetivamente. Averigua-se a propagação dos vórtices de esteira na figura 6.11, que representa a pressão dinâmica a uma altura de 10 cm do fundo do canal.

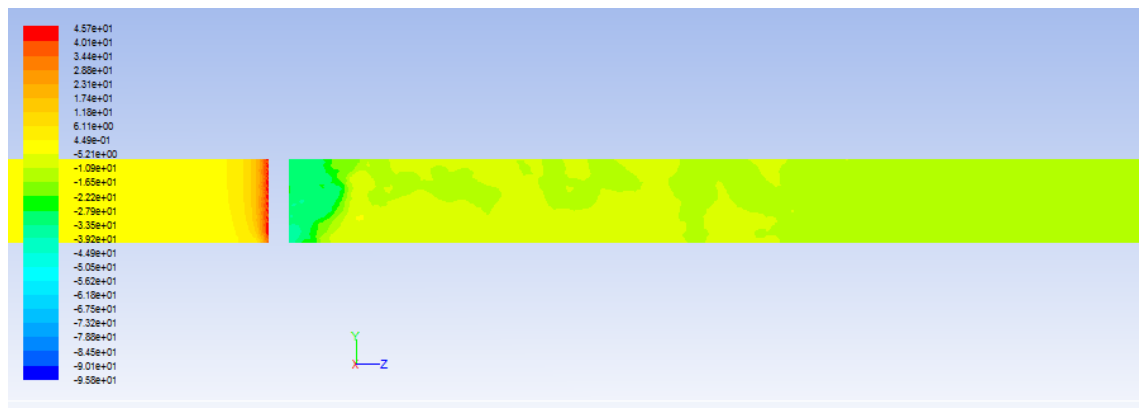


Fig. 6.9 – Pressão estática (corte longitudinal no eixo de simetria)

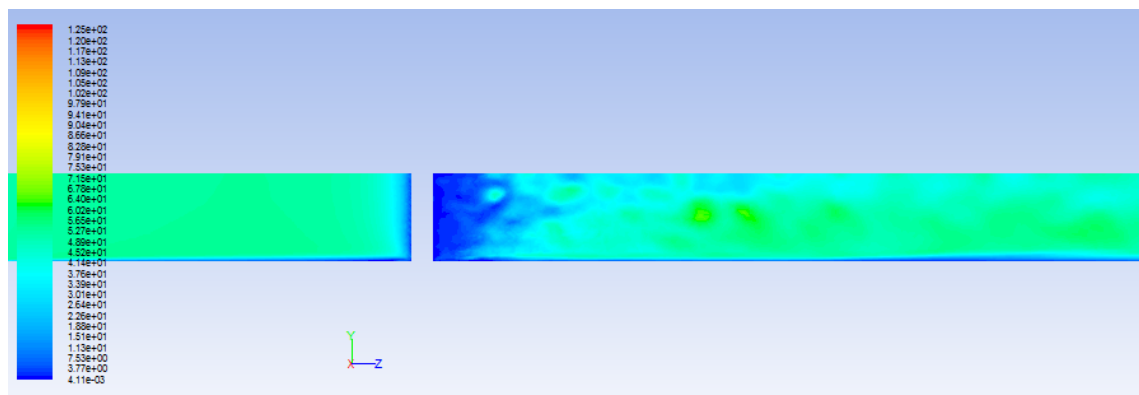


Fig. 6.10 – Pressão dinâmica (corte longitudinal no eixo de simetria)

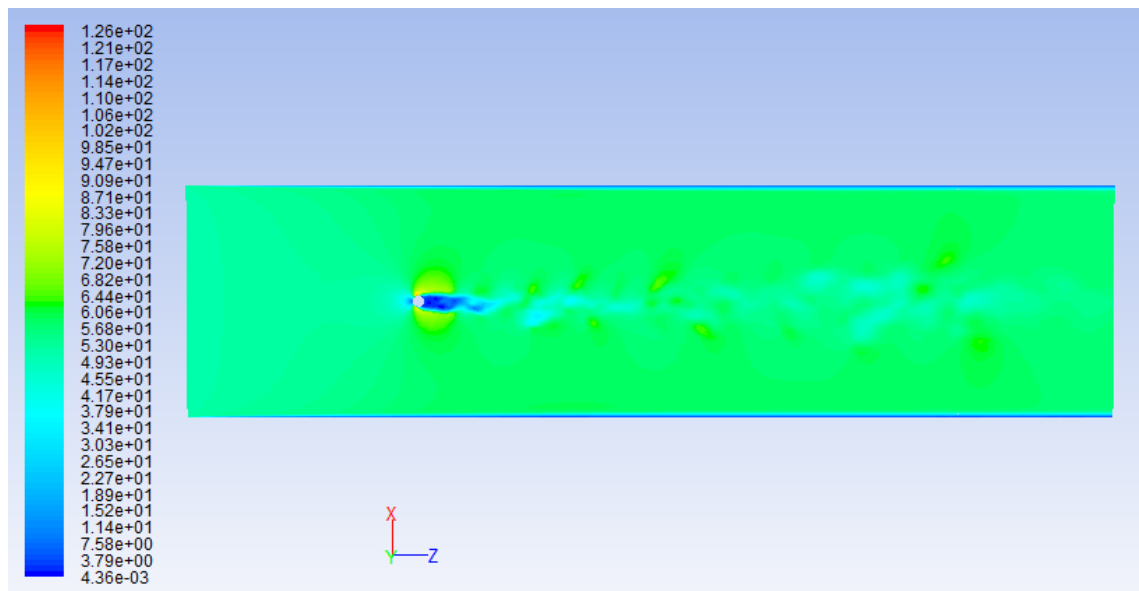


Fig. 6.11 – Pressão dinâmica no plano a 10 cm do fundo

A zona do fundo com maior pressão é aquela onde se forma o vórtice de ferradura. A partir da figura 6.12, constata-se que esta estrutura desempenha um papel fulcral no processo erosivo.

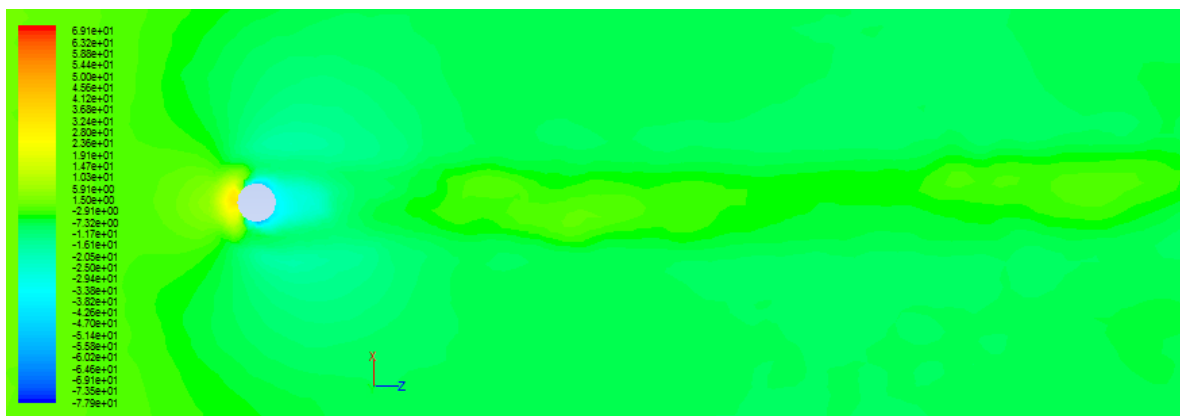


Fig. 6.12 – Pressão total no fundo

6.1.3 TENSÃO DE ARRASTAMENTO

A distribuição da força de arrastamento no fundo (figura 6.13) vem reforçar o que foi dito no subcapítulo 6.1.2, visto que as zonas de maior tensão de arrastamento coincidem, naturalmente, com as de maior pressão (figura 6.12). Na figura 6.13 comprova-se que as maiores tensões de arrastamento ocorrem na zona onde se forma a cavidade de erosão – em especial, na zona de desenvolvimento dos vórtices em ferradura, ou seja, a montante do pilar, onde ocorrem as maiores profundidades de erosão. O facto de o *Fluent* ter atribuído as maiores tensões de arrastamento às zonas onde experimentalmente se verificou haver maior erosão, é um indicador de que a simulação foi bem-sucedida.

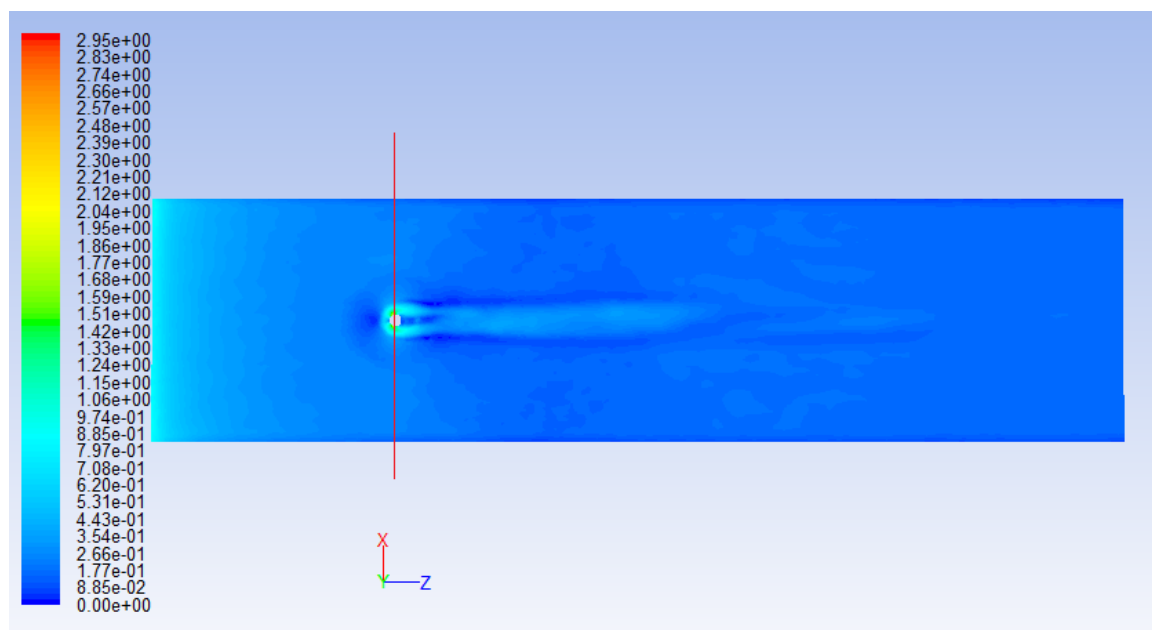


Fig. 6.13 – Tensões de arrastamento no fundo do canal

Na figura 6.14 estão registadas as tensões de arrastamento ao longo do fundo, na secção transversal distanciada a 1 metro da entrada do canal (plano vermelho na figura 6.13). Nota-se claramente o aumento brusco de tensão nas proximidades do pilar, o que explica as erosões aí ocorridas.

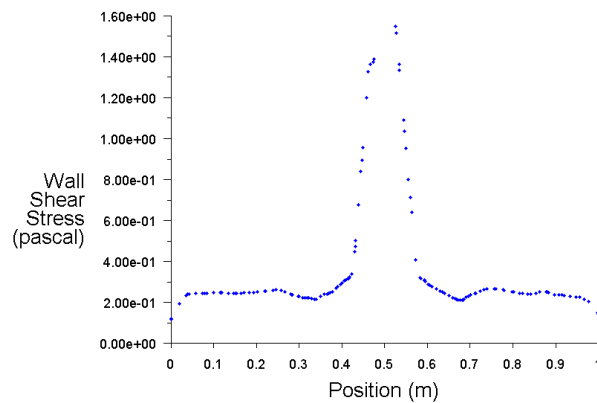


Fig. 6.14 – Variação da tensão de arrastamento no fundo na secção transversal que contém o pilar

Através do *Fluent* é possível saber o valor da tensão máxima de arrastamento no fundo do canal e compará-lo com os valores sugeridos por *Shields* (subcapítulo 2.4), de modo a prever se haverá, ou não, movimento das partículas. Como pode verificar-se pela figura 6.15, o valor máximo da tensão de arrastamento é de 1.8 Pa , registado imediatamente a montante do pilar, distribuídos segundo o gráfico apresentado, que requer algum cuidado na sua análise. O conjunto de pontos nele representado resulta da sobreposição de gráficos do tipo daquele representado na figura 6.16, isto é, ilustra a tensão de arrastamento, ao longo de vários planos longitudinais, paralelos às paredes do canal. A reta a vermelho representa a tensão crítica de arrastamento. Ao longo deste capítulo serão apresentados vários gráficos semelhantes a este, que permitem, através da sobreposição de pontos, visualizar os valores máximos para uma determinada grandeza.

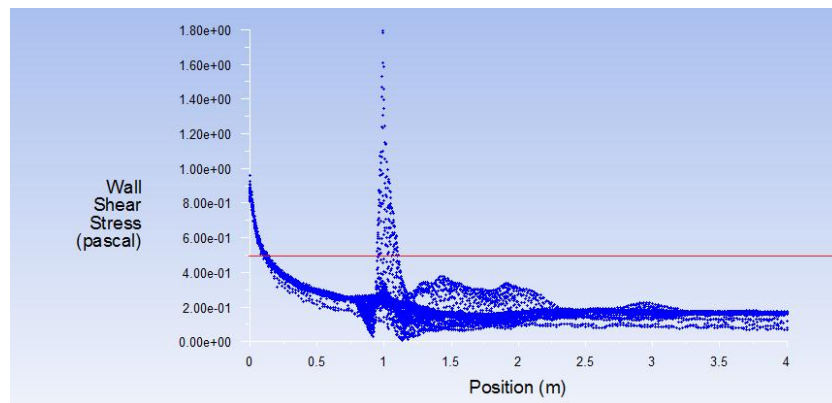


Fig. 6.15 – Tensões no fundo ao longo do canal

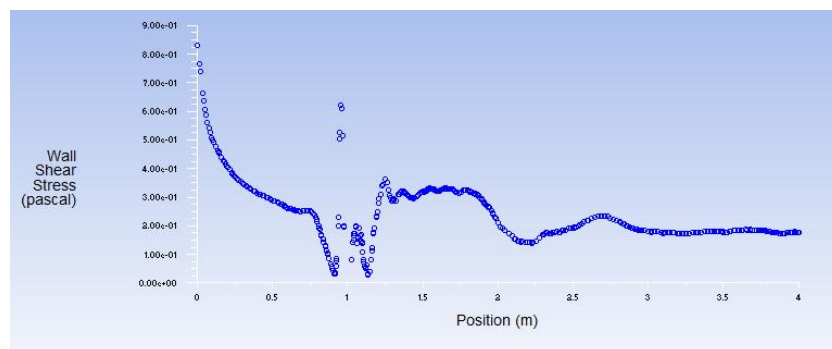


Fig. 6.16 – Tensões de arrastamento no fundo, ao longo do eixo de simetria

Na figura 6.15, é notório que existem certas zonas no fundo do canal onde as partículas registam tensões superiores à crítica (0.5 Pa), pelo que haverá movimento das mesmas. A tensão máxima obtida através do *Fluent* é $\tau_c = 1.80 \text{ Pa}$. Assim, vem:

$$X_{cr} = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \times \frac{D}{\nu} = 22.192 \quad (6.1)$$

$$Y_{cr} = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot D} = 0.129 \quad (6.2)$$

Este cálculo diz respeito à tensão verificada no fundo da configuração A, isto é, antes de haver erosão, o que torna obrigatório que o ponto (X,Y) se situe acima da curva de *Shields* (figura 6.17). Isto é um bom indicador de que a simulação numérica está, em parte, próxima da realidade.

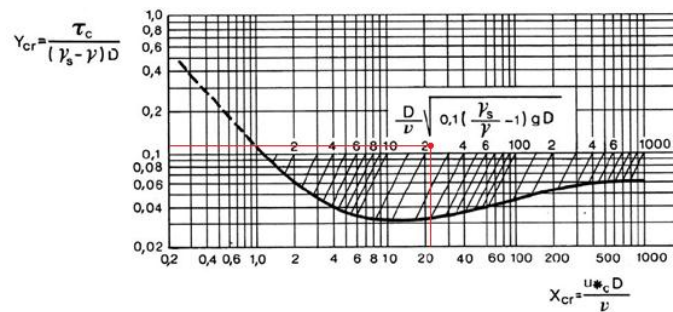


Fig. 6.17 – Posição do ponto (X,Y) em relação à curva de *Shields*

Na análise do mesmo parâmetro para a configuração B do fundo, ou seja, uma configuração de equilíbrio da cavidade de erosão – é esperado que a situação inversa ocorra, isto é, o ponto (X,Y) deverá situar-se abaixo da curva marcada no diagrama de *Shields*.

6.1.4 IMPULSÃO HIDRODINÂMICA NO PILAR

Da pressão atuante no pilar, representada na figura 6.18, resulta a força de arrasto no pilar. Com vista a avaliar a qualidade da simulação é imperativo comparar os resultados obtidos com aqueles existentes na bibliografia.

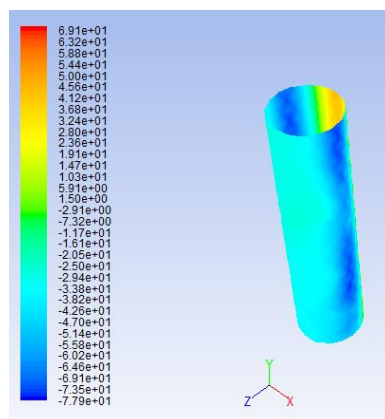


Fig. 6.18 – Pressão total no pilar

Para a configuração A (sem erosão), a partir da figura 3.4, calcula-se a força de arrasto no pilar [14]:

$$\frac{L}{D} = \frac{0.20}{0.05} = 4 \Leftrightarrow C_D = 0.73 \quad (6.3)$$

Logo, vem:

$$0.68 = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \times 1000 \times 0.32^2 \times (0.2 \times 0.05)} \Leftrightarrow F_D = 0.3482 \text{ N} \quad (6.4)$$

O *Fluent* permite obter facilmente a força de arrasto, através do menu *Force Reports*. Com esta funcionalidade consegue-se o resultado da impulsão hidrostática no pilar, no formato que se observa na figura 6.19, onde é discriminado o tipo de força e as respetivas componentes.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
Zone	Forces (n)		
pilar	Pressure 0.35452040	Viscous 0.02779943	Total 0.3823198
Net	0.35452040	0.02779943	0.3823198

Fig. 6.19 – *Force report* para o pilar

Como seria de esperar para este escoamento, a contribuição da pressão para a força de arrasto é predominante, ainda que a componente correspondente às forças viscosas não seja negligenciável. A diferença percentual entre os 0.38 N (equação 6.4) e o resultado da simulação realizada é de apenas 1.72%. A força de sustentação é nula, para o presente caso, segundo o exposto no capítulo 2.2.

6.2 SIMULAÇÃO Nº 2: CONFIGURAÇÃO A – MODELO SST $k-\omega$

Os cálculos referentes a esta simulação demoraram cerca de 37 horas, com os resíduos a tomarem os valores representados na figura 6.20. Já foi previamente referido que o modelo $k-\omega$ não resolve todas as escalas de turbulência, mas, em vez disso, modela todas elas como uma única, razão pela qual não é possível assistir à formação e ao desprendimento de vórtices (figura 6. 21). A formulação SST $k-\omega$ não é tão exigente em termos de recursos computacionais, relativamente ao modelo da simulação anterior. Assim, esta simulação tornou-se bem mais rápida do que a anterior.

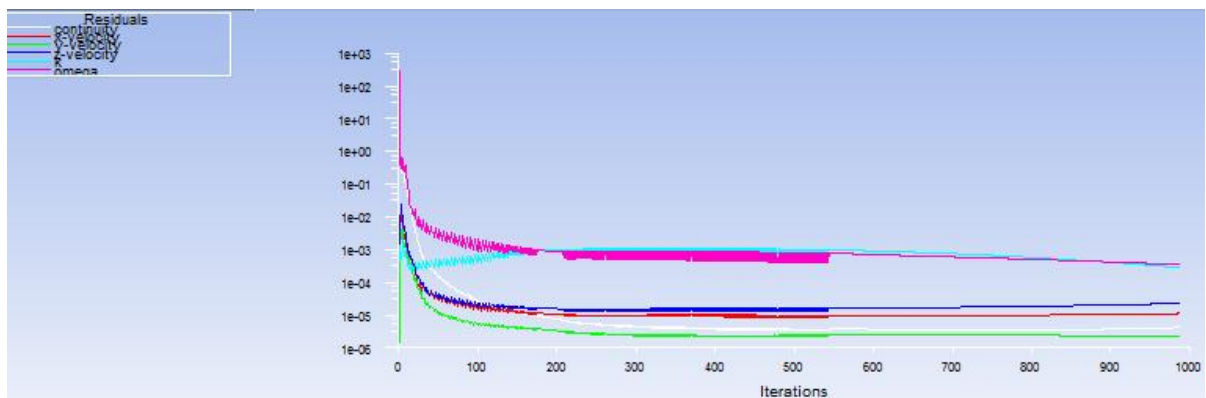


Fig. 6.20 – Variação dos resíduos ao longo das iterações

6.2.1 CAMPO DE VELOCIDADES

Tal como esperado, o campo de velocidades representado na figura 6.21 (plano horizontal a 10 cm do fundo) é perfeitamente simétrico, uma vez que este modelo de turbulência não permite a resolução dos vórtices de esteira. Pela mesma razão, na figura 6.22 não se identificam perturbações na esteira, notando-se o decréscimo de velocidade provocado pela influência do pilar.

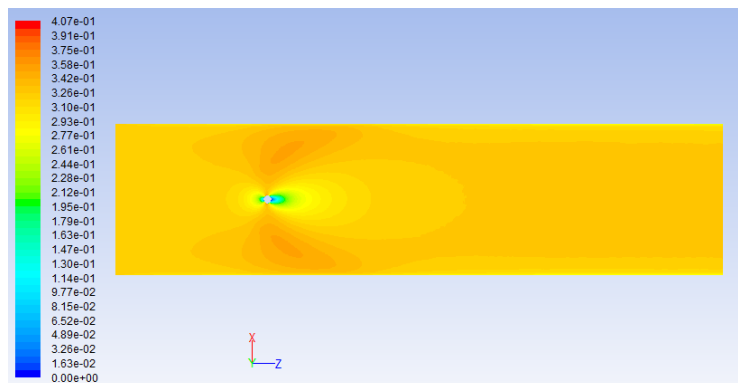


Fig. 6.21 – Campo de velocidades a 10 cm do fundo

As baixas velocidades longitudinais observadas imediatamente a montante do pilar, na figura 6.22, são explicadas pelo escoamento descendente (figura 2.2). Os valores máximos e mínimos das velocidades representadas são similares às da simulação anterior (figura 6.5), contudo a distribuição deste parâmetro assume algumas diferenças entre as duas simulações.

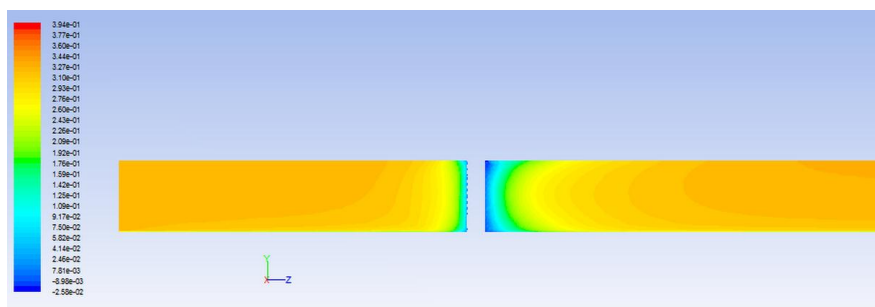


Fig. 6.22 – Velocidade longitudinal no eixo de simetria do canal

O padrão das velocidades a 1 mm do fundo do canal é ilustrado na figura 6.23. A distribuição desta grandeza ao longo do plano representado descreve uma forma que faz lembrar a cavidade de erosão que se formará no decorrer do processo. Note-se que ao longo do eixo de simetria, os valores tendem a ser mais baixos, razão pela qual pode-se explicar o assoreamento que se forma a jusante.

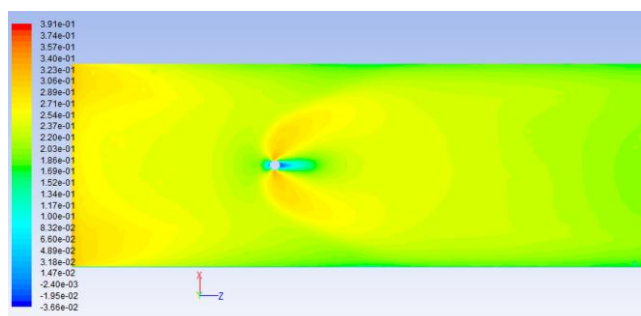


Fig. 6.23 – Velocidades longitudinais a 0.1 cm do fundo

6.2.2 PRESSÕES

Em concordância com a simulação anterior (subcapítulo 6.1), as maiores pressões a atuar no fundo localizam-se na zona a montante do pilar, onde a erosão atinge maior profundidade (figura 6.24).

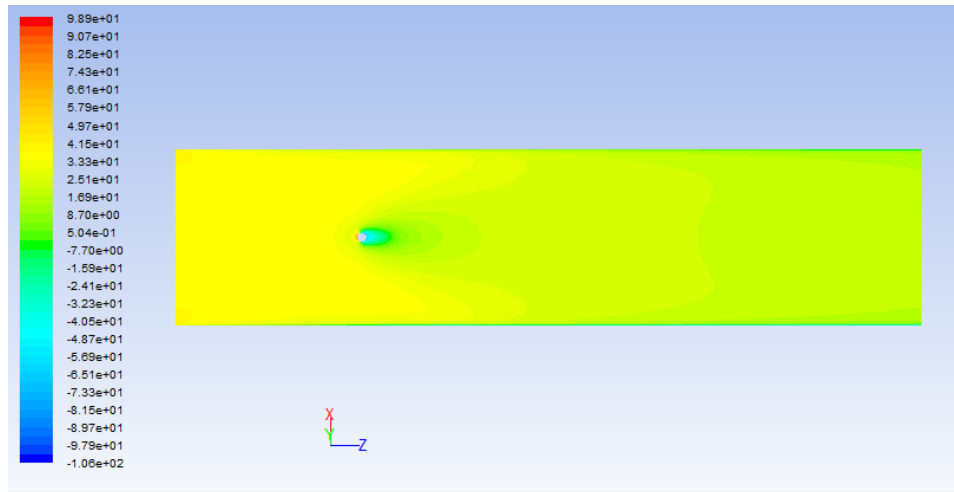


Fig. 6.24 – Pressão total no fundo

Num plano que dista 10 cm do fundo, os valores da pressão assumem a distribuição ilustrada pela figura 6.25.

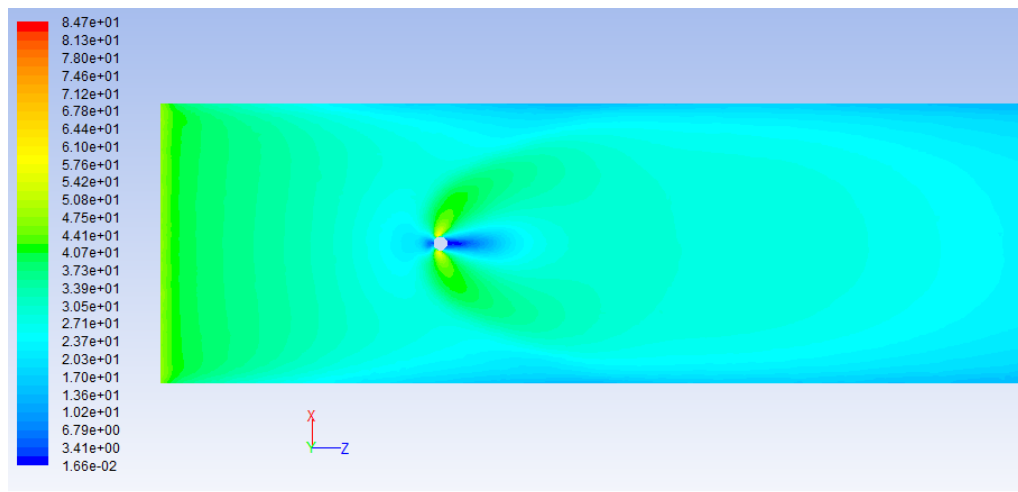


Fig. 6.25 – Pressão a 10 cm do fundo

6.2.3 TENSÃO DE ARRASTAMENTO

Como o tensor de tensões deste modelo está estreitamente relacionado com o gradiente de velocidades (subcapítulo 4.3.1.2), a distribuição das tensões de arrastamento no fundo do canal (figura 6.26) tem a mesma configuração que o perfil de velocidades. As tensões na zona de entrada do canal tomam valores elevados, já que o perfil de velocidades (que, inicialmente, é constante) evolui para um perfil de velocidades típico do escoamento desenvolvido. Por esta razão, as tensões de arrastamento à entrada do canal não foram consideradas para os cálculos seguintes.

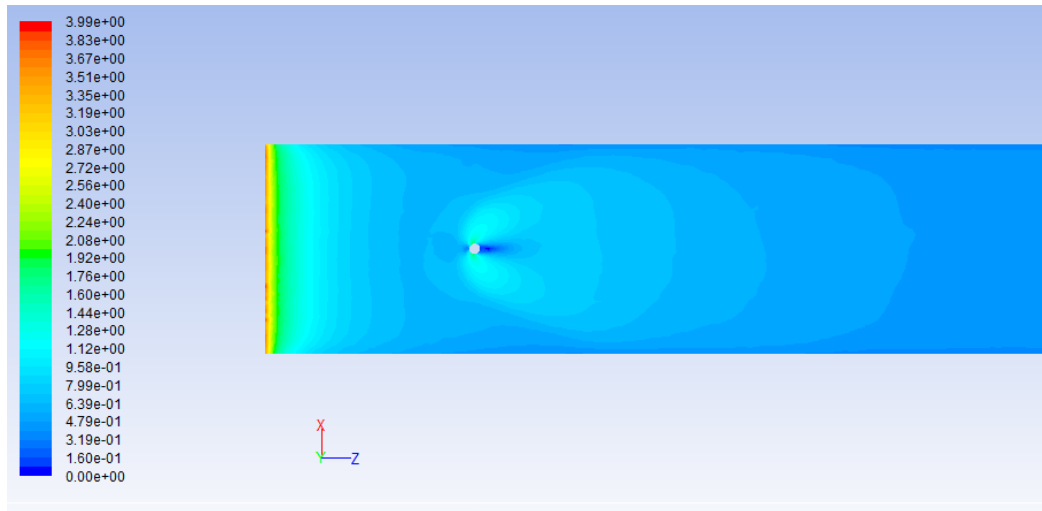


Fig. 6.26 – Tensões de arrastamento no fundo

Pelos motivos acima referidos e pela figura 6.27, conclui-se que esta simulação não tem a mesma qualidade que a simulação anterior (subcapítulo 6.1), no que diz respeito ao cálculo das tensões de arrastamento. No entanto, ambas apontam um acréscimo de tensão na zona onde se formou a cavidade de erosão, provando, assim, que as duas simulações são conclusivas, quanto a este parâmetro.

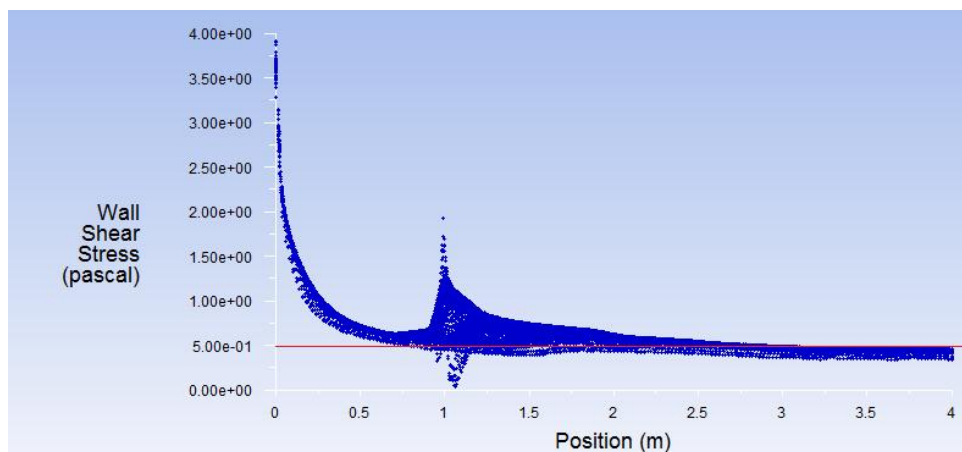


Fig. 6.27 – Tensões no fundo, ao longo do canal

Desprezando as tensões geradas na região de “entrada” do canal, a tensão máxima de arrastamento no fundo do canal é de 2.1 Pa (figura 6.27). Com as equações 6.3 e 6.5, obtém-se o ponto assinalado na figura 6.28 ($X_{cr} = 24.0$, $Y_{cr} = 0.15$)

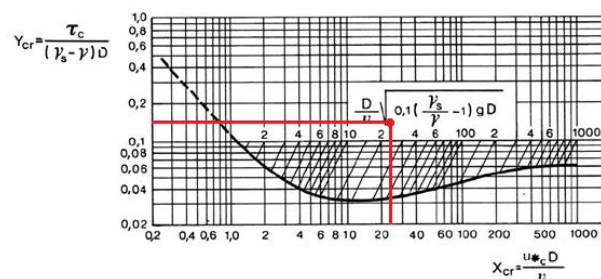


Fig. 6.28 – Posição do ponto (X,Y) em relação à curva de Shields

A figura 6.29 representa a variação da tensão de arrastamento ao longo da secção transversal que contém o pilar. Como pode ver-se é bastante diferente relativamente à sugerida pela simulação anterior. No entanto, os valores máximos continuam a verificar-se nas proximidades do pilar.

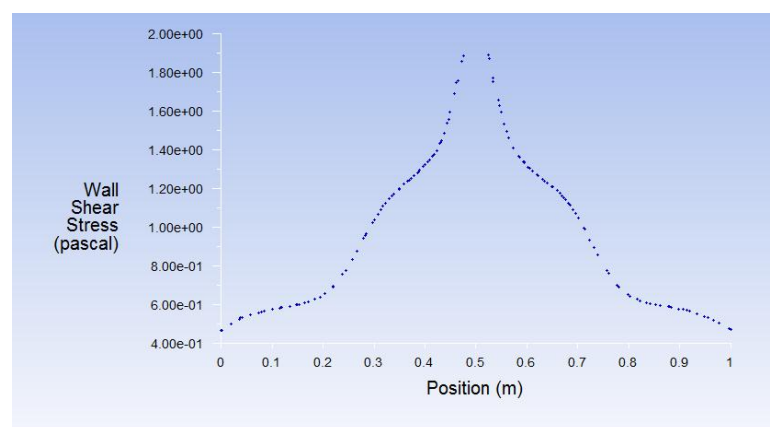


Fig. 6.29 – Variação da tensão de arrastamento na secção transversal que contém o pilar

6.2.4 IMPULSÃO HIDRODINÂMICA NO PILAR

Para esta simulação, a impulsão hidrodinâmica no pilar é de 0.44 N, como pode verificar-se na figura 6.30. Esta força resulta das pressões representadas na figura 6.31, tomando a resultante de 0.44 N. Um resultado que difere 15.8 % relativamente aos 0.38 N calculados segundo o exposto no subcapítulo 6.1.4.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
pilar	0.4065295	0.035066603	0.4415961
Net	0.4065295	0.035066603	0.4415961

Fig. 6.30 – Force report para o pilar

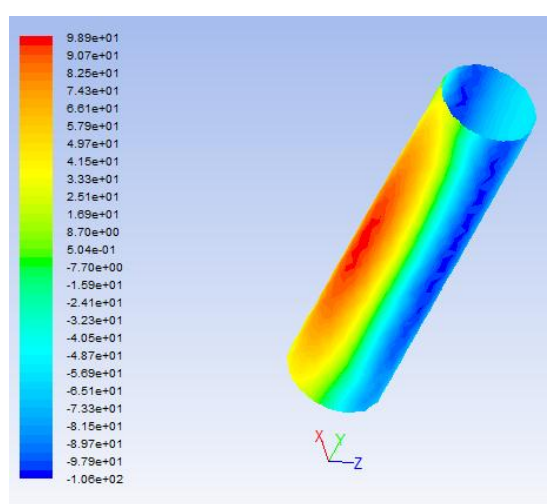


Fig. 6.31 – Pressão no pilar

6.3 SIMULAÇÃO Nº 3: CONFIGURAÇÃO B – MODELO LES

A geometria da configuração B é mais complexa do que a anterior, resultando numa malha com uma discretização mais difícil (figura 6.32). Isto levou a tempos de processamento maiores, sendo que para simular aproximadamente 20 segundos de escoamento foram necessárias sensivelmente 73 horas de cálculo. Importa lembrar que para a simulação nº1 (subcapítulo 6.1), na qual foi usado o mesmo modelo de turbulência, o tempo de processamento de dados foi de 73 horas para uma simulação de 20 segundos de escoamento. As exigências de capacidade de armazenamento também aumentam com a complexidade da malha do modelo.

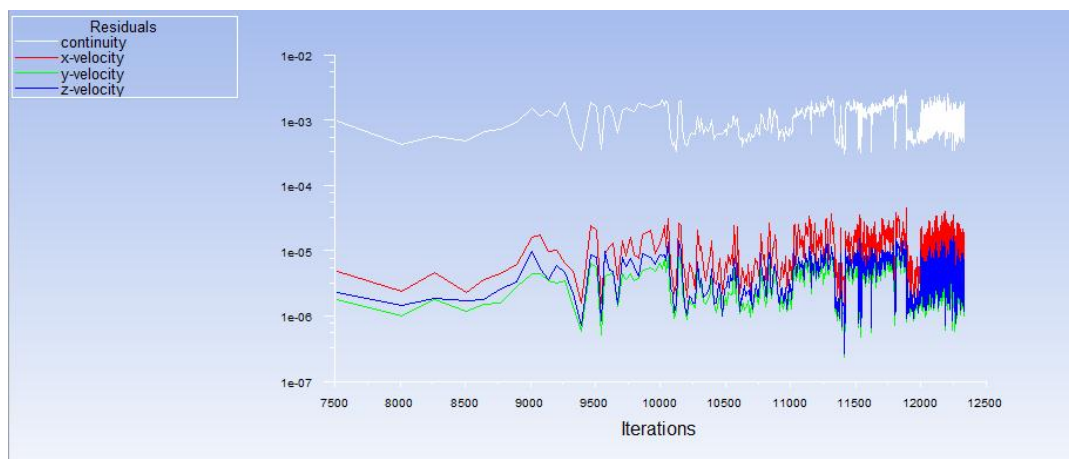


Fig. 6.32 – Variação dos resíduos ao longo das iterações

6.3.1 CAMPO DE VELOCIDADES

Atendendo à figura 6.33, é possível constatar que a nova configuração do fundo do canal alterou significativamente o padrão de velocidades anterior. A velocidade com que o escoamento atinge o pilar ronda os 0.27 m/s. Esta diminuição é explicada pelo aumento da secção de escoamento naquela zona.

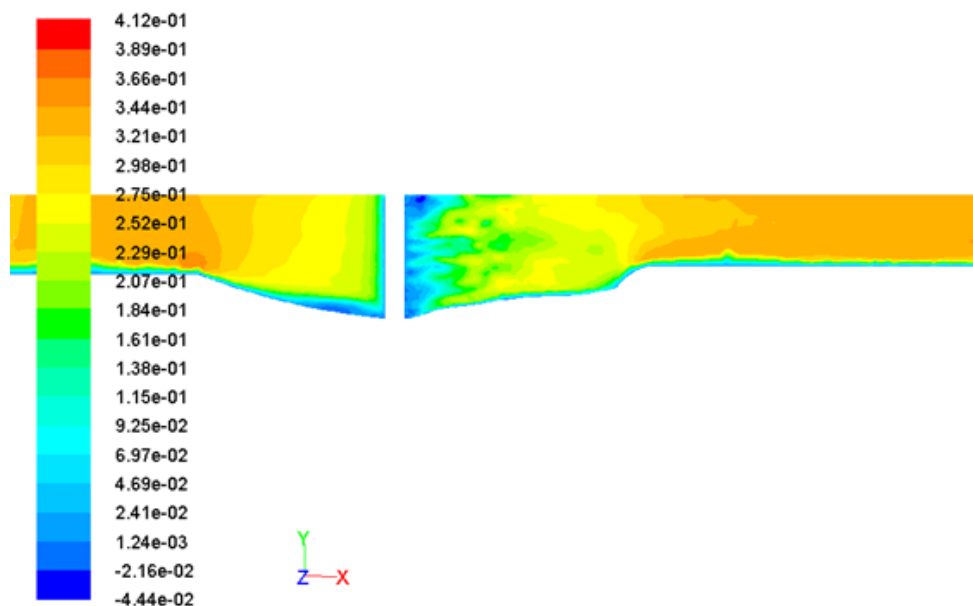


Fig. 6.33 – Velocidade longitudinal no eixo de simetria do canal

Desde já verificam-se mais diferenças em relação à configuração sem erosão, entre as quais, a perda de nitidez dos vórtices de esteira, já que a sua dissipação é mais rápida (figuras 6.34).

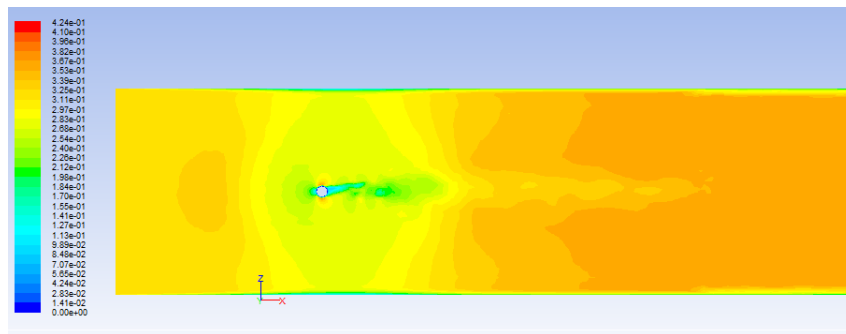


Fig. 6.34 – Campo de velocidades a 0.10 m da superfície livre

A trajetória das partículas na zona a montante do pilar evidencia vórtices em ferradura de maior dimensão, comparativamente aos da configuração de fundo sem erosão (figura 6.8). Através do módulo de visualização do *Fluent* que permite traçar as trajetórias das partículas num determinado período de tempo, foi possível rastrear o movimento dos vórtices em ferradura, assim como pequenos indícios do escoamento descendente que se desenvolve junto ao pilar (figura 6.35).

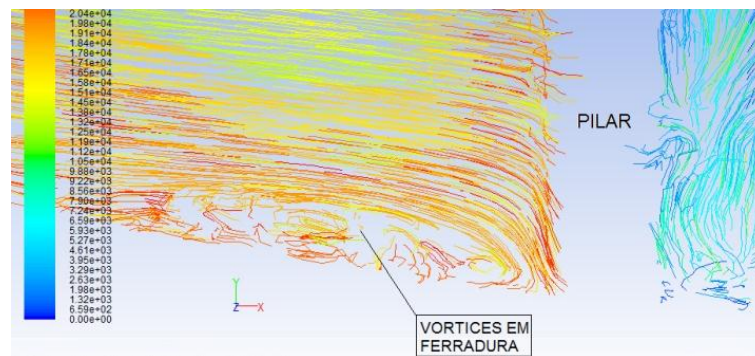


Fig. 6.35 – Linhas de trajetória das partículas

Na configuração A, a maioria das partículas descreve uma velocidade em torno dos 0.32 m/s, que era a velocidade de aproximação do escoamento. Com a formação e a estabilização da cavidade de erosão, o campo de velocidades alterou-se de forma bastante significativa, como pode comprovar-se pela figura 6.36. A diminuição da velocidade longitudinal média deve-se ao aumento da secção transversal causada pela cavidade de erosão.

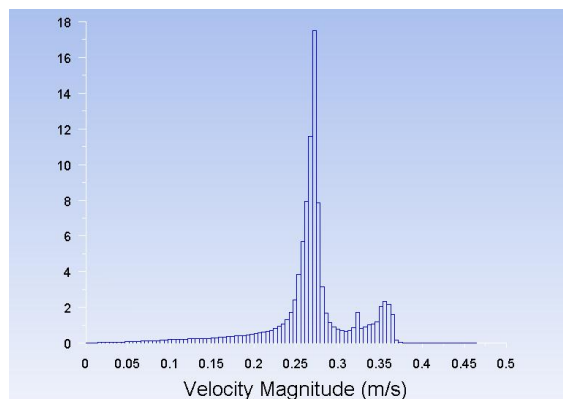


Fig. 6.36 – Distribuição da velocidade das partículas

6.3.2 PRESSÕES

A distribuição de pressões ilustrada pela figura 6.37 evidencia a presença dos vórtices referidos no subcapítulo 6.3.1, porque apresentam valores baixos na zona onde aquelas estruturas ganham forma (figura 6.35).

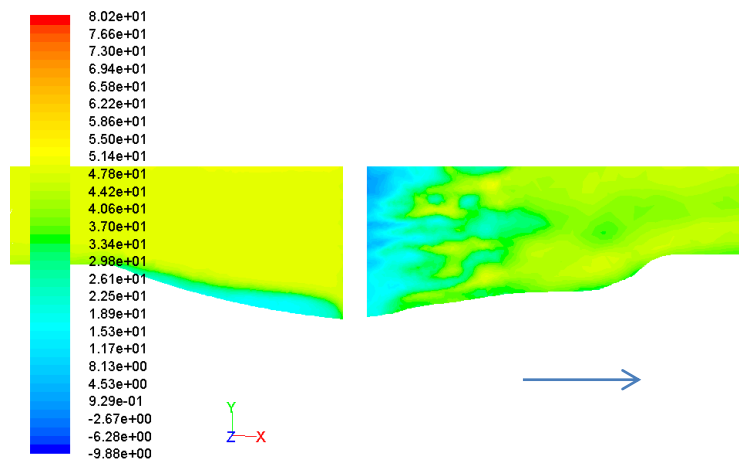


Fig. 6.37 – Pressão no eixo de simetria do canal

O modelo geométrico da configuração B inicialmente construído, obtido através das curvas de nível (figura 3.21), representava o fundo do canal com elevado rigor. No entanto, alguns obstáculos induzidos pela falta de capacidade do *Fluent* processar elementos demasiados esbeltos [5] obrigaram a simplificar o referido modelo. Assim, a geometria possui algumas arestas (assinaladas na figura 6.38) que induzem algumas pressões adicionais.

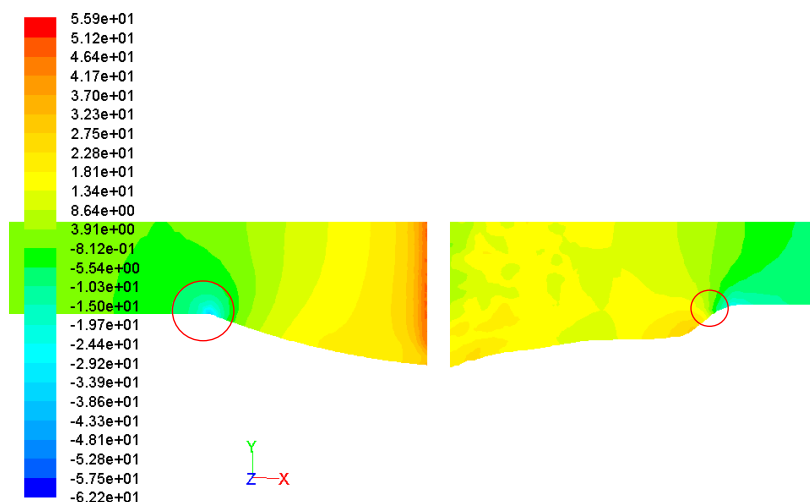


Fig. 6.38 – Pressões estáticas no plano longitudinal coincidente com o eixo de simetria

Na distribuição das pressões no fundo (figura 6.39) é possível notar que o paramento de jusante da cavidade de erosão é a zona que regista as menores pressões.

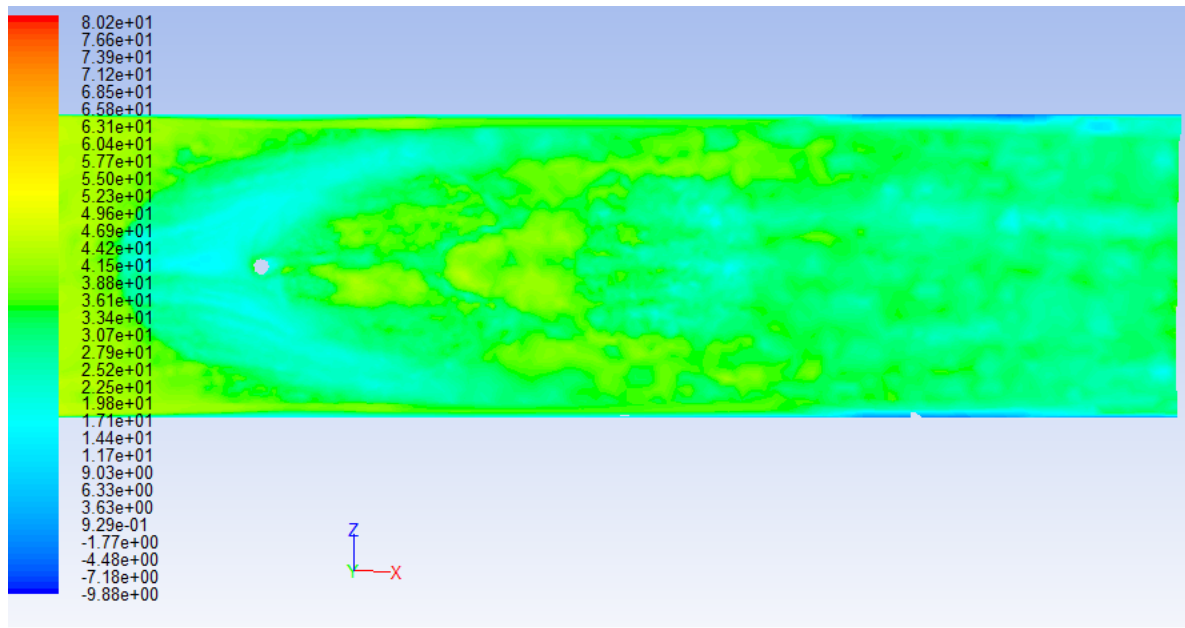


Fig. 6.39 – Pressão no fundo

6.3.3 TENSÃO DE ARRASTAMENTO

Devido à pequena lacuna mencionada no subcapítulo 6.3.2, também as tensões no fundo evidenciam valores inesperados, em particular na fronteira da cavidade de erosão com o fundo do canal. Na zona da cavidade, a tensão de arrastamento evidencia valores mais baixos do que no resto do fundo (figura 6.39), o que está de acordo com as menores velocidades aí registadas (figura 6.34).

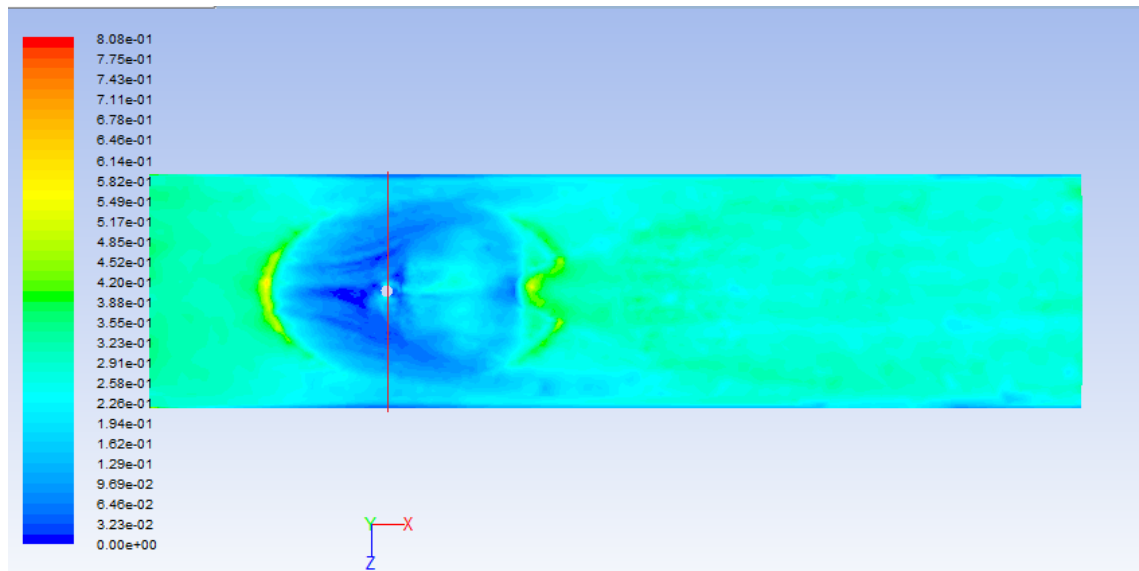


Fig. 6.39 – Tensões de arrastamento no fundo do canal

Nesta fase, a tensão de arrastamento já não demonstra ser muito influenciada pela presença do pilar (comparativamente ao que acontecia na configuração A), embora ali ocorram as maiores tensões. O gráfico da figura 6.40 representa a sobreposição da distribuição das tensões de arrastamento em várias secções paralelas à assinalada a vermelho na figura 6.39. Isto corresponde com a realidade constatada

no ensaio laboratorial, no qual se observou que, mesmo depois do equilíbrio, algumas partículas depositadas na zona em torno do pilar eram arrastadas pelo escoamento.

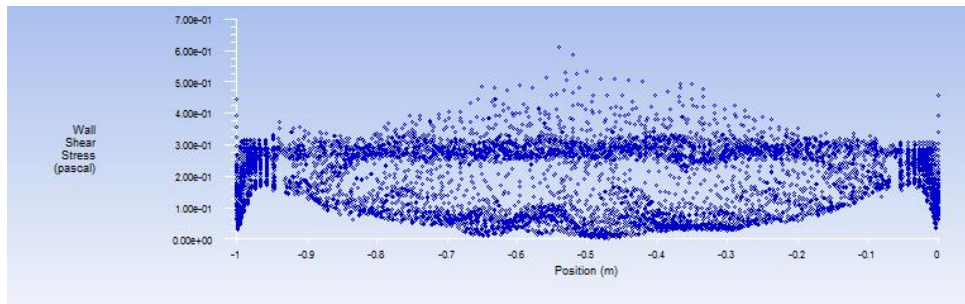


Fig. 6.40 – Variação da tensão de arrastamento na secção assinalada

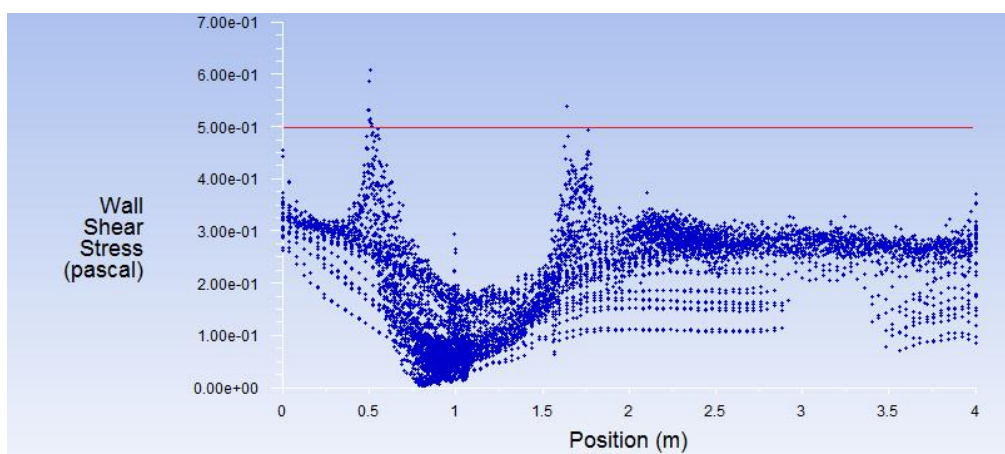


Fig. 6.41 – Tensões no fundo, ao longo do canal

Excluindo os valores registados nas zonas com o problema aludido, extrai-se da figura 6.41 o valor da tensão máxima. Adotando $\tau_c = 0.4 \text{ Pa}$ como valor máximo na zona da cavidade, vem que $X_{cr} = 10.5$ e $Y_{cr} = 0.029$. Na figura 6.42, a azul, está representado o ponto com as coordenadas acima calculadas.

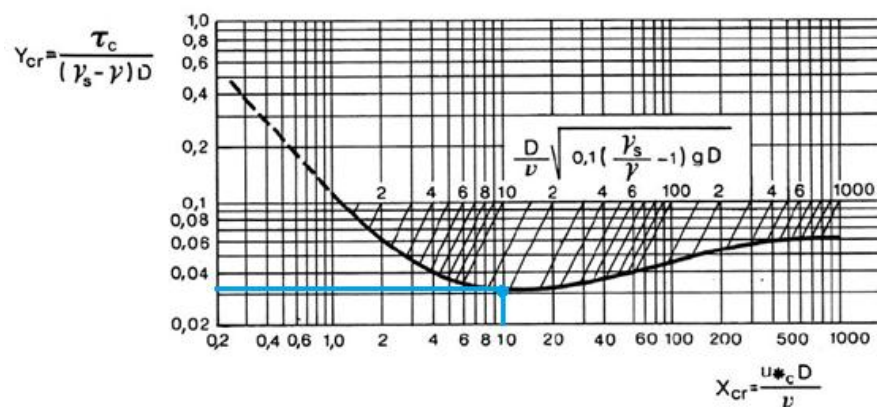


Fig. 6.42 – Posição do ponto (X,Y) em relação à curva de Shields

Como pode verificar-se, o ponto de tensão de arrastamento máxima está ligeiramente coincide ligeiramente com a curva de Shields, ou seja, corresponde a uma situação de equilíbrio. Este resultado está de acordo com o esperado. Parece legítimo concluir que as presentes simulações numéricas

representam adequadamente a tensão de arrastamento, interveniente fundamental no processo erosivo. A sua análise por simulações numéricas poderá ser um caminho viável para o estudo dos processos erosivos.

6.3.4 IMPULSÃO HIDRODINÂMICA NO PILAR

Uma vez que o escoamento sofre um decréscimo de velocidades significativo na cavidade de erosão, é expectável uma redução da força de arrasto no pilar. Essa força, resultante da distribuição de pressões da figura 6.43, toma o valor de 0.26 N , cujas parcelas encontram-se discriminadas na figura 6.44.

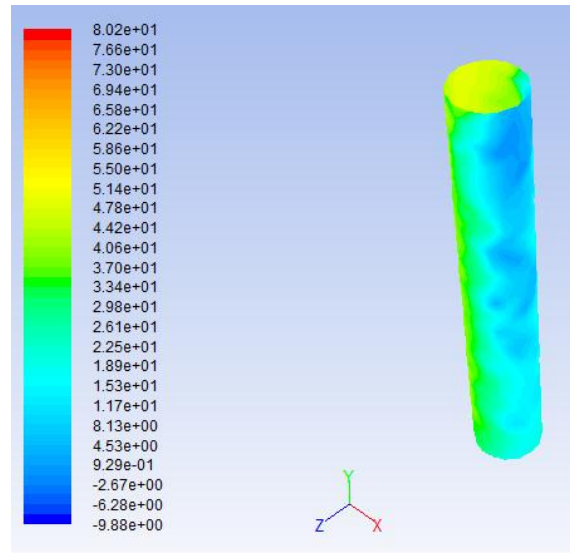


Fig. 6.43 – Pressão no pilar

Forces - Direction Vector (1 0 0)			
Zone	Forces (n)		
pilar	Pressure	Viscous	Total
	0.24586236	0.011585539	0.2574479
Net	0.24586236	0.011585539	0.2574479

Fig. 6.44 – Force report para o pilar

Tal como foi realizado no subcapítulo 6.3.4, calcula-se a força de arrasto no pilar expectável para esta configuração, resultando em $F_D=0.2534\text{ N}$. Logo, o valor obtido pela simulação numérica regista uma diferença percentual de apenas 1.82%.

6.4 SIMULAÇÃO Nº 4: CONFIGURAÇÃO B – MODELO SST $k-\omega$

Após 42 horas de cálculo computacional chegou-se aos 20 segundos de escoamento pretendidos. Devido à geometria complexa e às exigências do modelo a precisão não foi a desejada. Um *time-step* menor conduziria a *resíduos* mais baixas do que as registadas (figura 6.47), porém devido ao tempo escasso disponível para a realização de todas as simulações, foi preferida uma solução com menor precisão, em prol de uma maior rapidez nos cálculos.

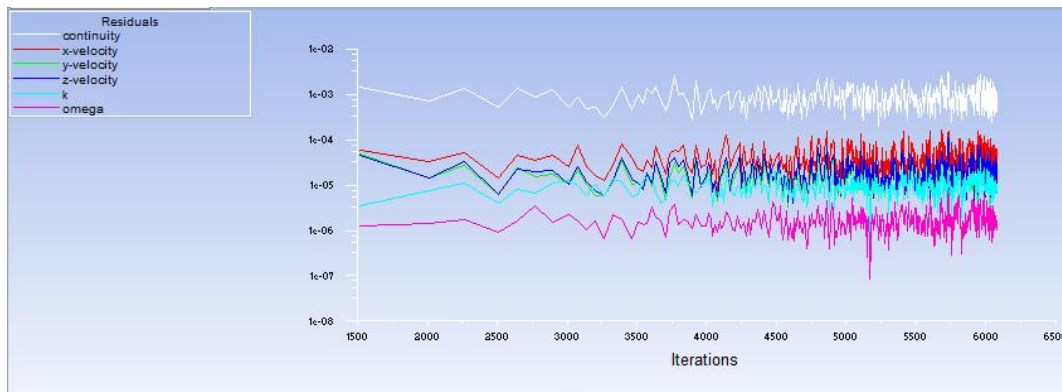


Fig. 6.45 – Variação dos resíduos ao longo das iterações

6.4.1 CAMPO DE VELOCIDADES

A formulação $k-\omega$ traduz o campo de velocidades de um modo mais homogêneo e com valores ligeiramente menores (figura 6.46), relativamente ao LES.

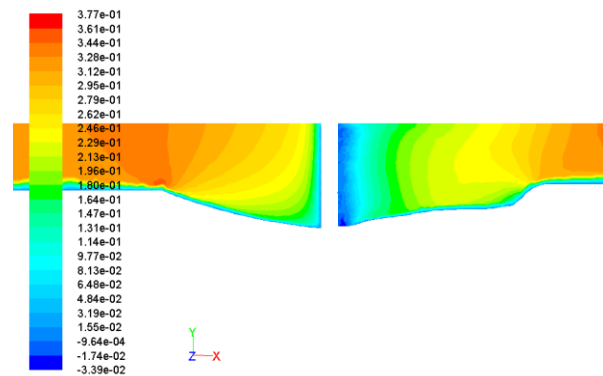


Fig. 6.46 – Velocidades longitudinais no eixo de simetria do canal

Tal como a simulação nº3 (subcapítulo 6.3) demonstrou, existe um ligeiro decréscimo relativo de velocidade na zona da cavidade de erosão, devido ao aumento da secção. Na zona de aproximação à cavidade de erosão nota-se um aumento de velocidade, possivelmente devido à mudança de direcção do escoamento e a uma aceleração local. Mais a jusante, as velocidades são maiores do que a do escoamento natural, em parte, devido ao assoreamento de sedimentos que se verificou naquela zona (figura 6.47).

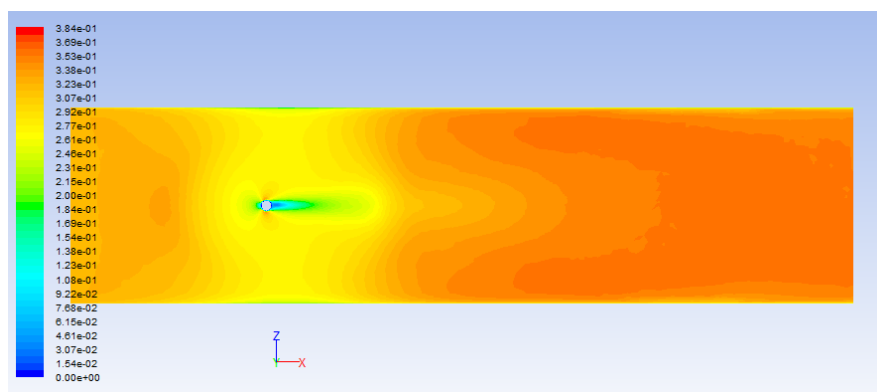


Fig. 6.47 – Campo de velocidades a 0.10 m da superfície livre

6.4.2 PRESSÕES

A figura 6.48 mostra que a pressão dinâmica no fluido é bastante inferior na zona da cavidade, em relação ao resto do canal. A pressão estática máxima (registada na face de montante do pilar) ronda os 50 Pa (figura 6.49), enquanto na simulação com o modelo LES rondava os 56 Pa. Esta diferença não é muito relevante, portanto, admite-se que os modelos são similares para caraterizar as pressões estáticas.

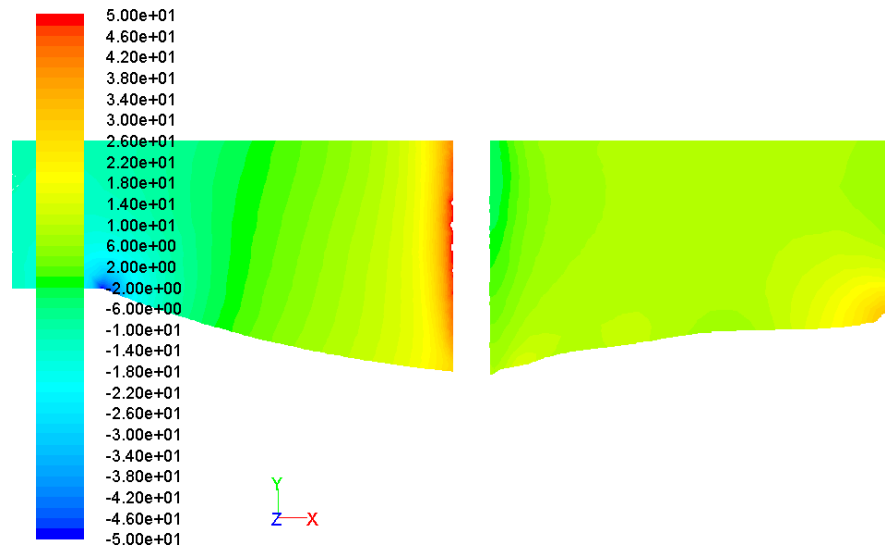


Fig. 6.48 – Pressões estáticas (corte longitudinal coincidente com o eixo de simetria)

A pressão no fundo (figura 6.49) é consideravelmente mais baixa do que a configuração anterior, fazendo prever menores tensões de arrastamento.

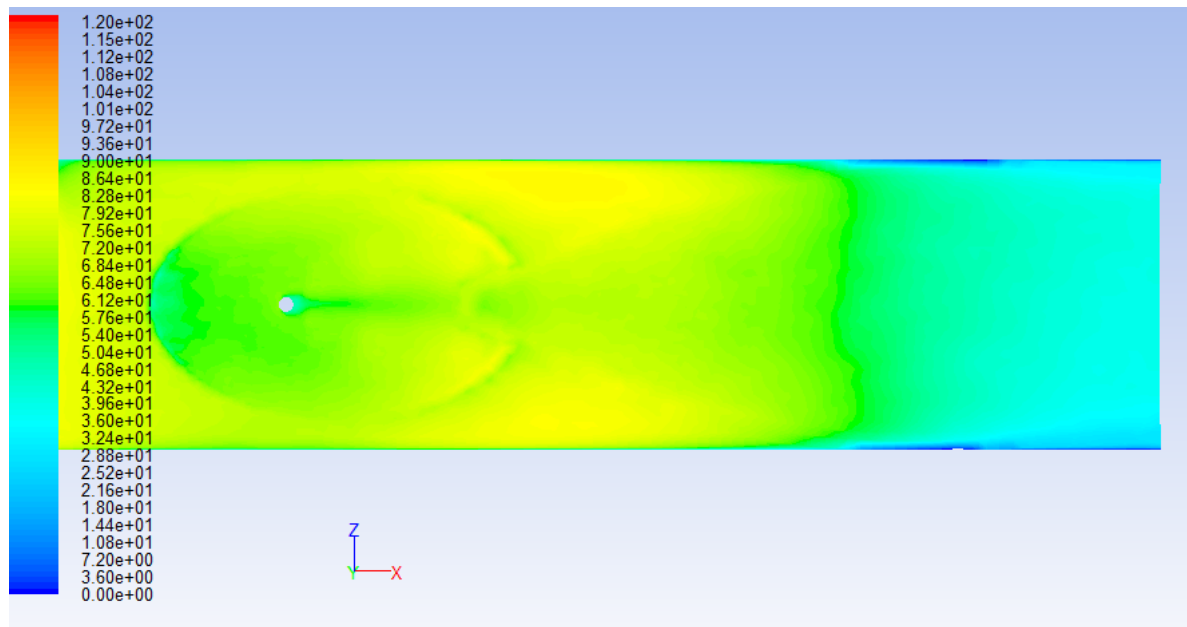


Fig. 6.49 – Pressão no fundo

6.4.3 TENSÕES DE ARRASTAMENTO

Como já se verificou na simulação nº 2 (subcapítulo 6.2), o modelo SST $k-\omega$ apresenta valores elevados da tensão do fundo à entrada do canal. (ver figura 6.50)

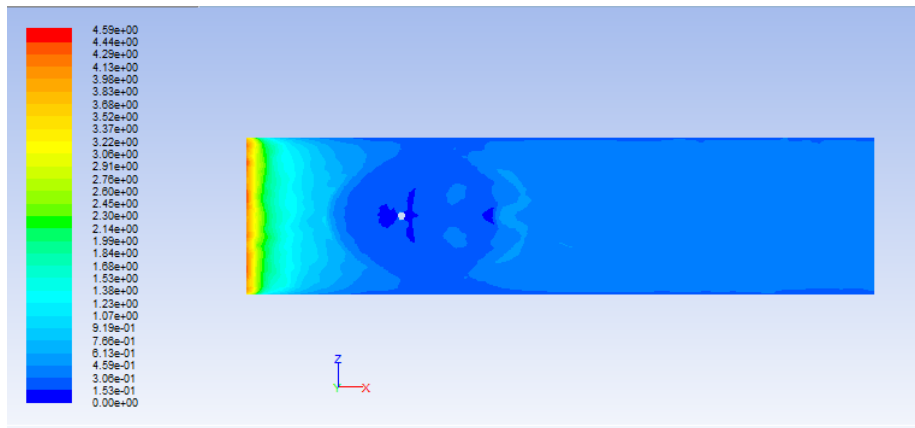


Fig. 6.50 – Tensão de arrastamento no fundo

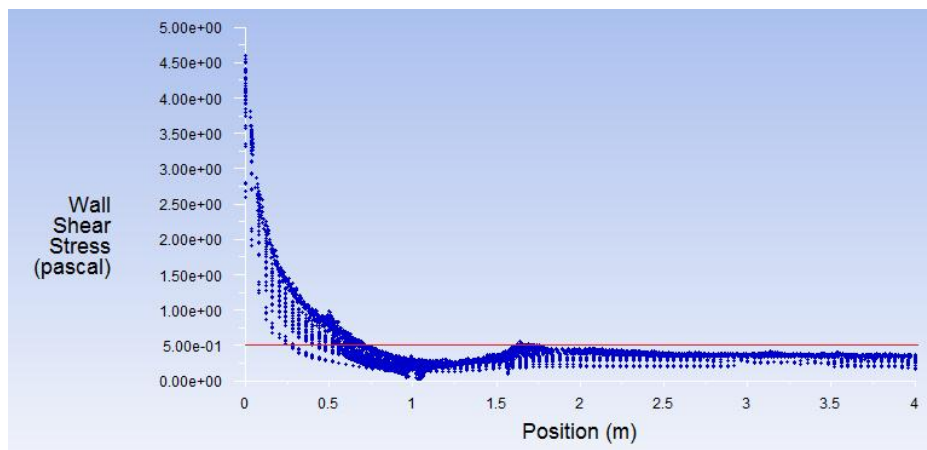


Fig. 6.51 – Tensões no fundo, ao longo do canal

Devido à problemática exposta no subcapítulo 6.2.3, não foram consideradas as tensões na zona inicial do canal. Posto isto, a tensão de arrastamento máxima dentro da cavidade de erosão ronda os 0.5 Pa (figura 6.51). Assim, vem que $X_{cr}=14.79$ e $Y_{cr}=0.058$ (figura 6.52), que se situam justamente na curva de *Shields*, dado o valor registado ser precisamente o valor da tensão crítica de arrastamento.

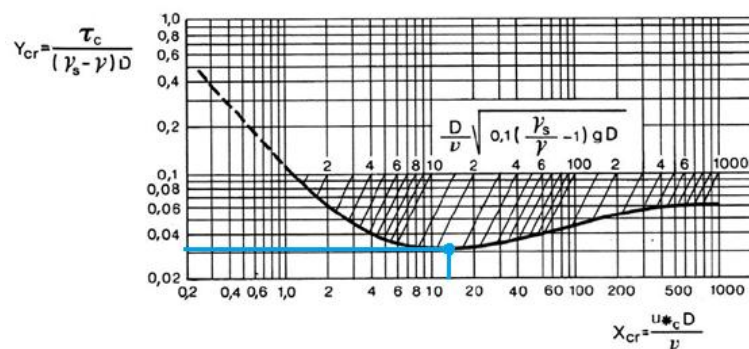


Fig. 6.52 – Posição do ponto (X,Y) em relação à curva de *Shields*

6.4.4 IMPULSÃO HIDRODINÂMICA NO PILAR

Segundo o *Fluent*, o pilar sofre uma ação de 0.41 N (figura 6.53), um valor ainda distante dos 0.253 N sugeridos pela bibliografia (diferença percentual de 62.1%).

Forces - Direction Vector (1 0 0)			
Zone	Forces (n)		
pilar	Pressure	Viscous	Total
	0.39329952	0.016831763	0.41013128
Net	0.39329952	0.016831763	0.41013128

Fig. 6.53 – Force report para o pilar

A simulação nº2 (subcapítulo 6.2) já tinha evidenciado um erro considerável no cálculo da força de arrasto no pilar. Dada a geometria mais complexa, essa imprecisão é maior para esta simulação. Isto pode ser resolvido por uma malha ainda mais refinada ou um *time-step* menor. No entanto, a simulação continua a ser útil para tirar outras conclusões, relativamente a outros parâmetros, como verificado anteriormente.

6.5 SIMULAÇÃO Nº 5: PILAR COM 100 MM DE DIÂMETRO, CONFIGURAÇÃO A – MODELO LES

A geometria desta simulação é a correspondente à configuração A, isto é, com um fundo plano, sem erosão. Com o novo diâmetro, o número de *Reynolds* passa a ser o dobro do anterior, ou seja $Re=31684$. A diferença no número de *Reynolds* não é significativa ao ponto de mudar o tipo de regime. A separação continua a ser laminar e a esteira, por sua vez, turbulenta (tabela 1.1).

A simulação realizada reproduziu 20 segundos de escoamento, tendo demorado aproximadamente 65 horas de processamento, ou seja, ligeiramente menos que a simulação análoga com o pilar de 50 mm de diâmetro. Os resíduos que caracterizam a qualidade das iterações (figura 6.54) são idênticos aos da simulação nº1 (subcapítulo 6.1).

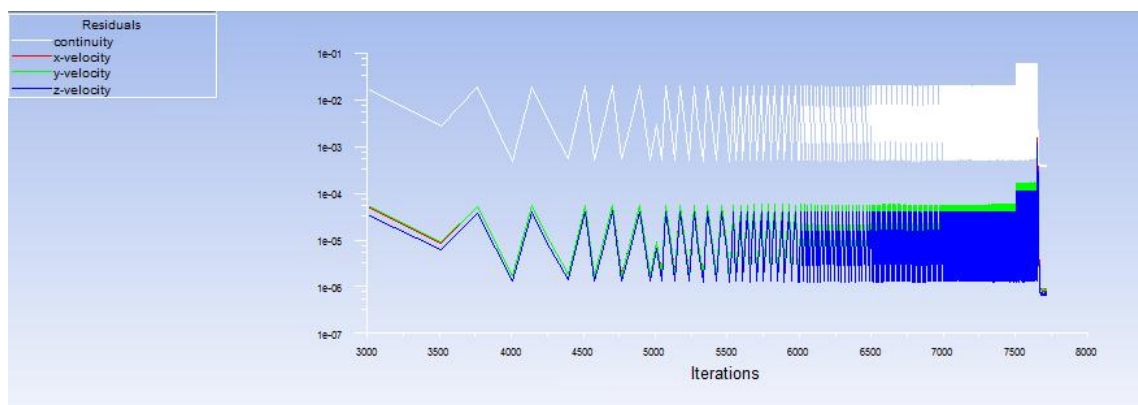


Fig. 6.54 – Variação dos resíduos ao longo das iterações

6.5.1 CAMPO DE VELOCIDADES

O principal propósito de realizar uma simulação extra foi o de caracterizar melhor os vórtices que se geram devido à presença de um obstáculo no seio do escoamento. Pelo campo de velocidades é possível notar mais nitidamente estas estruturas, relativamente às simulações anteriores. Na figura 6.55, está representado o campo de velocidades a um plano que dista 10 cm do fundo do canal. Convém realçar que a alteração de diâmetro não influencia, pelo critério adotado (equação 2.6), a

velocidade crítica de arrastamento e, portanto, a velocidade de aproximação adotada no escoamento é a mesma que a das simulações anteriores (0.32 m/s).

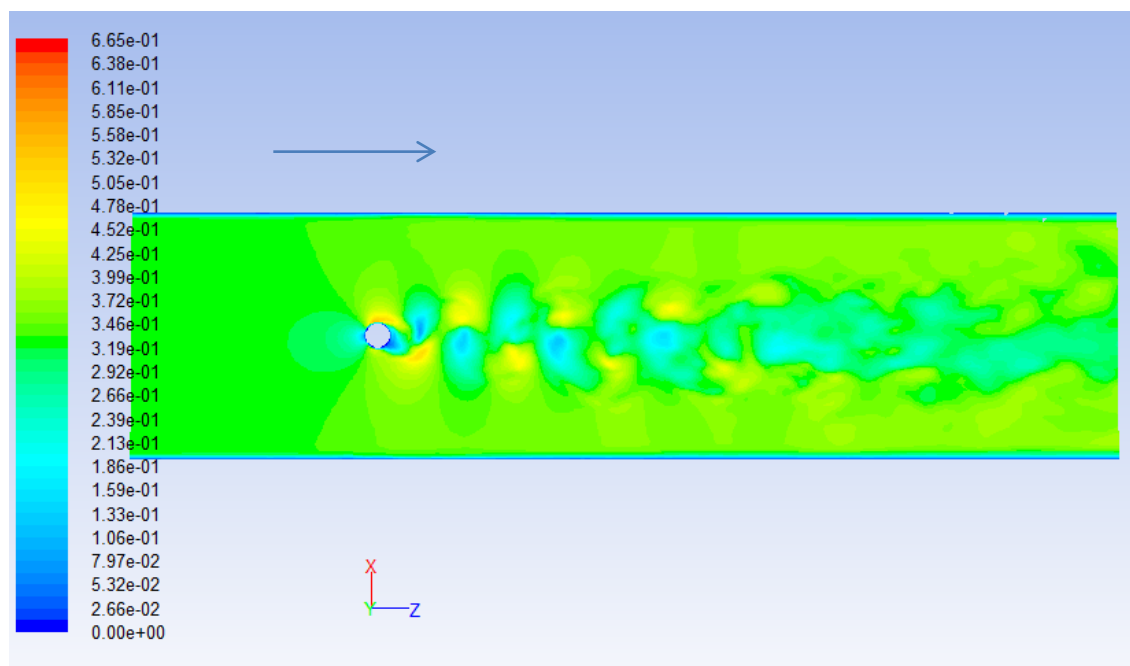


Fig. 6.55 – Campo de velocidades a 0.10 m do fundo do canal

As maiores velocidades ocorrem junto ao pilar, mais propriamente na zona da separação laminar do escoamento (figura 6.56 - zona A). Valores elevados são também evidentes nas zonas de contorno dos vórtices (figura 6.56 - zona B), enquanto no centro a velocidade é quase nula (figura 6.56 - zona C). Os valores máximos rondam os 0.6 m/s, correspondendo quase ao dobro da velocidade natural do escoamento (0.32 m/s).

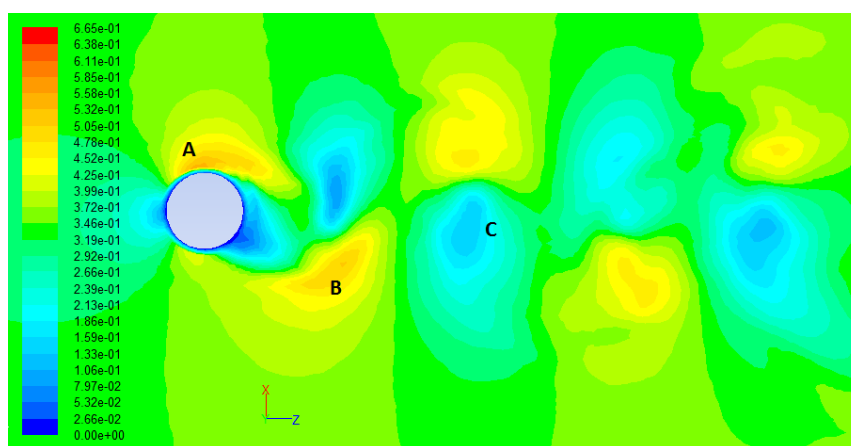


Fig. 6.56 – Campo de velocidades a 10 cm do fundo

Assim, fica descrita a distribuição das velocidades num plano paralelo ao fundo do canal. De seguida, efetua-se o mesmo para o plano perpendicular, que passa no eixo de simetria do canal (figura 6.57). É também evidente o desprendimento dos vórtices e as perturbações que o pilar provoca no escoamento, perturbações essas que se vão dissipando à medida que se deslocam para jusante.

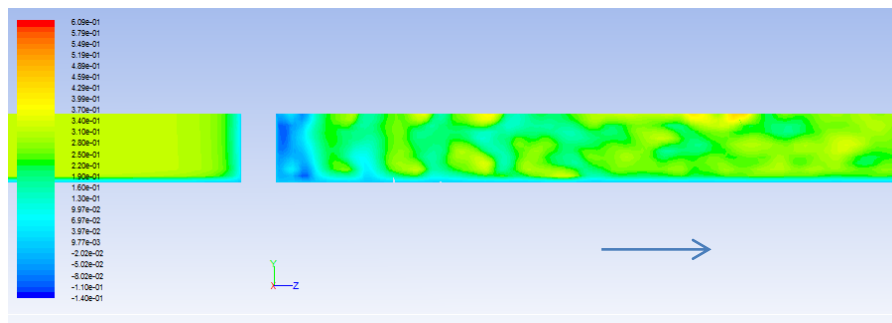


Fig. 6.57 – Velocidade longitudinal no eixo de simetria do canal

O sentido dos vetores da velocidade representados na figura 6.58 sugere que os vórtices contribuem para o transporte de sedimentos das zonas onde atuam para “dentro”, isto é, para a zona do eixo de simetria. Na opinião do autor, isto pode contribuir, em parte, para a formação do assoreamento de sedimentos que é usual ocorrer neste tipo de fenómeno.

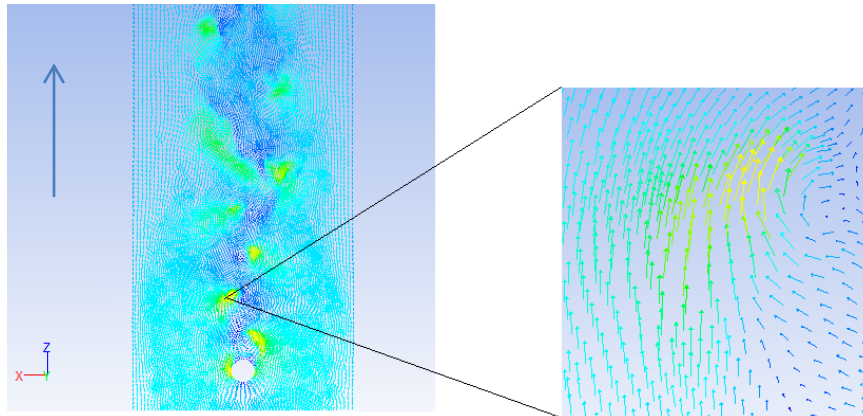


Fig. 6.58 – Pormenor dos vetores velocidade a 1 mm do fundo do canal

6.5.2 PRESSÕES

A distribuição da pressão estática no fundo do canal reflete a ideia de que os vórtices podem desempenhar um papel importante no transporte de sedimentos (figura 6.59).

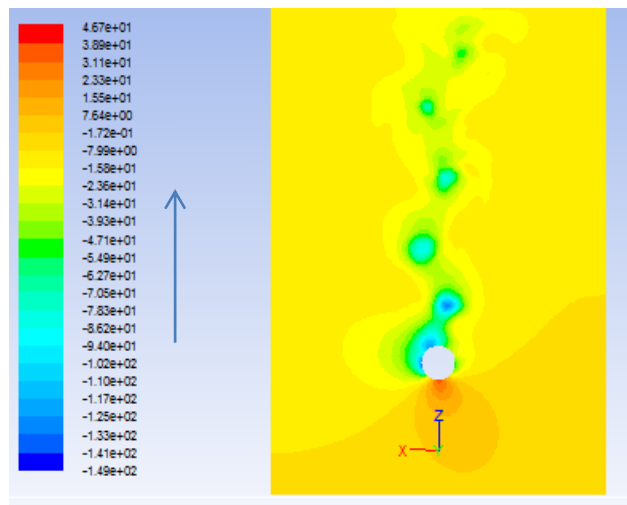


Fig. 6.59 – Pressão estática no fundo (t=20 s)

Junto ao pilar, o escoamento produz também pressões que variam consoante o sentido do vórtice que está a formar-se (figura 6.59). É esta variação de pressão que provoca o efeito que se descreveu no subcapítulo 2.1, sobre o risco de o pilar atingir a frequência de ressonância devido ao desprendimento dos vórtices [17].

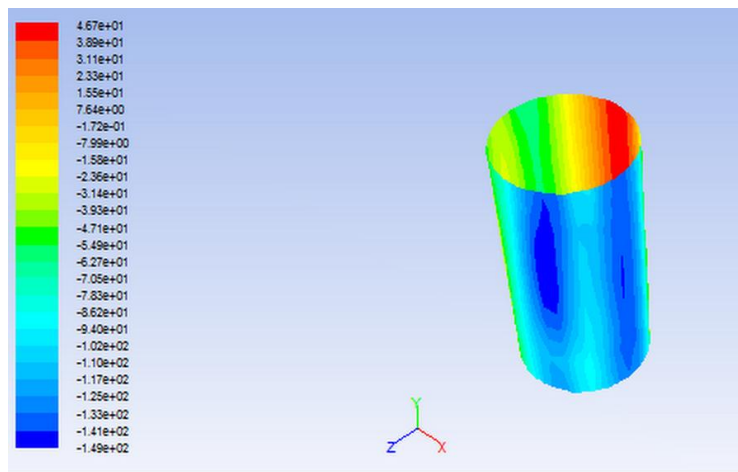


Fig. 6.60 – Pressão estática no pilar ($t=20$ s)

É interessante analisar o que a alternância dos vórtices provoca. Na figura 6.63, encontra-se a distribuição de pressões estáticas no fundo do canal, para um tempo de escoamento de $t=12$ segundos, onde o vórtice que se está a desprender do pilar tem o sentido oposto ao do $t=20$ s (figura 6.62).

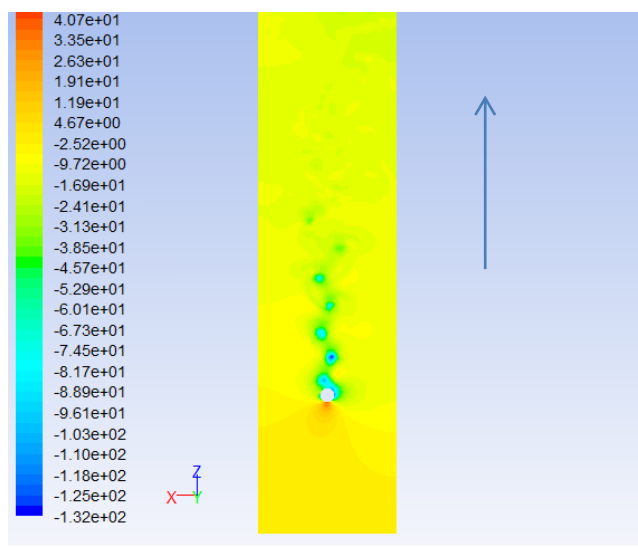


Fig. 6.61 – Pressões estáticas no fundo do canal, para um tempo de escoamento de $t=12$ s

O efeito da alternância dos vórtices é notório quando se comparam as figura 6.61 e 6.63 e as figuras 6.62 e 6.64. As figuras retratam dois momentos (um aos 12 segundos e o outro, por sua vez, aos 20 segundos de escoamento) em que os sentidos dos vórtices que se desprendem do pilar são opostos, provocando variações de pressão.

Relativamente ao pilar, este sofre uma maior pressão na zona a montante, o que era expectável (é ali onde o escoamento colide primeiramente). No entanto, denota-se a variação de pressão provocada pela variação da vorticidade do vórtice que está a desprender-se (figura 6.62).

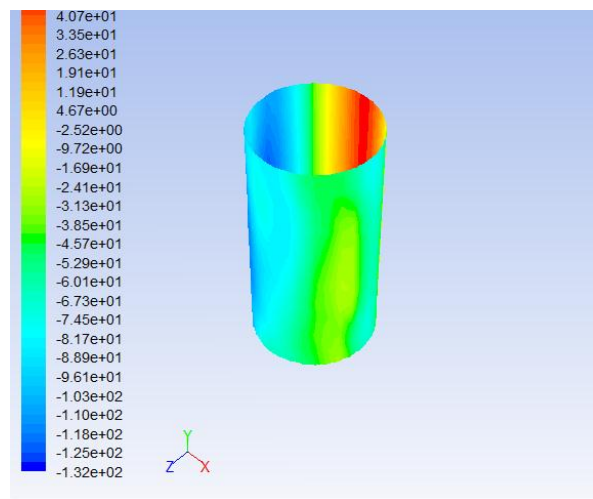


Fig. 6.62 – Pressão estática no pilar (t=12 s)

6.5.3 TENSÕES DE ARRASTAMENTO

A figura 6.63 ilustra bem o motivo pelo qual valeu a pena realizar esta simulação, já que se conclui, através dela, que os vórtices podem desempenhar um papel importantíssimo no transporte de sedimentos, quando são caracterizados por uma dimensão significativa. Para a altura de escoamento considerada e um pilar de 100 mm de diâmetro, a influência dos vórtices nas tensões de arrastamento no fundo é considerável.

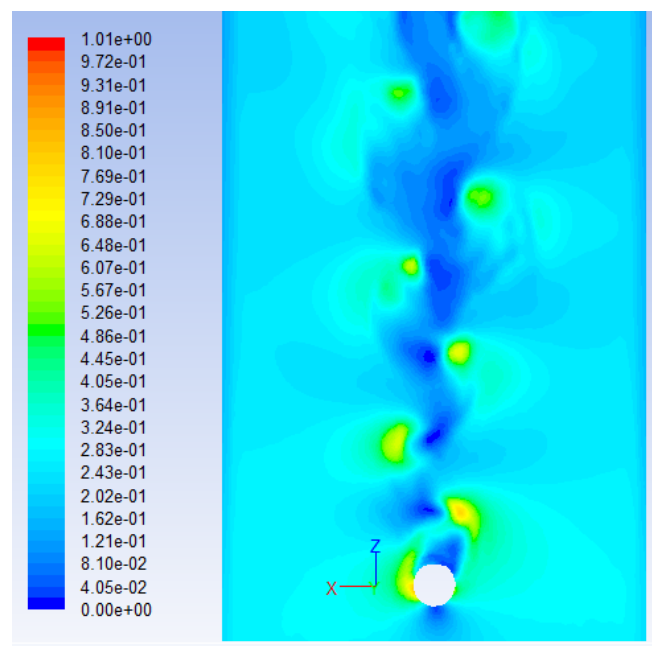


Fig. 6.63 – Tensões de arrastamento no fundo do canal

Na figura 6.66 assiste-se à distribuição da tensão de arrastamento na secção transversal que contém o pilar, notando-se, mais uma vez, o efeito da alternância de vórtices, visto que, esta grandeza, para este momento (t=20 s) é maior do lado em que o vórtice se desprende.

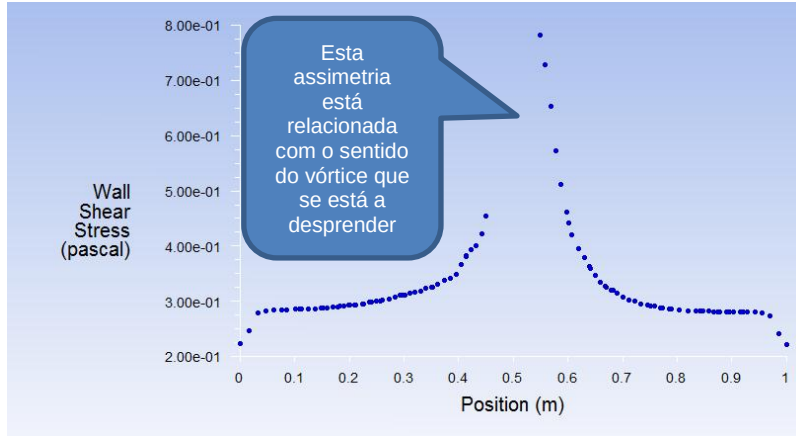


Fig. 6.64 – Variação da tensão de arrastamento na secção transversal que contém o pilar (vista de jusante)

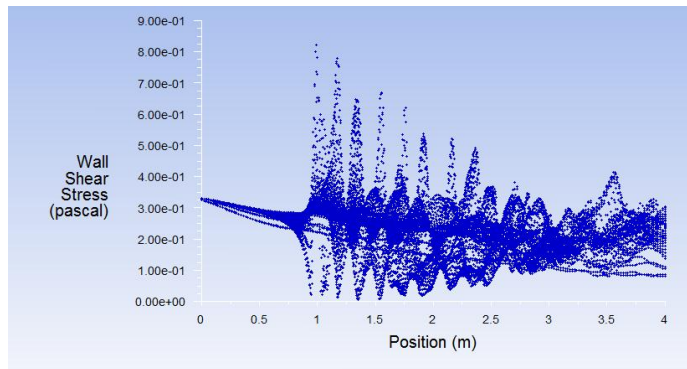


Fig. 6.65 – Tensões no fundo, ao longo do canal

Pelo gráfico da figura 6.65, sabemos que $\tau_c = 0.85 \text{ Pa}$, logo:

$$X_{cr} = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \times \frac{D}{\nu} = 15.25 \quad (6.5)$$

$$Y_{cr} = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot D} = 0.061 \quad (6.6)$$

Assinalando o ponto dado pelas coordenadas anteriormente calculadas no diagrama de *Shields* (figura 6.66), confirma-se que haverá movimento nas partículas do fundo.

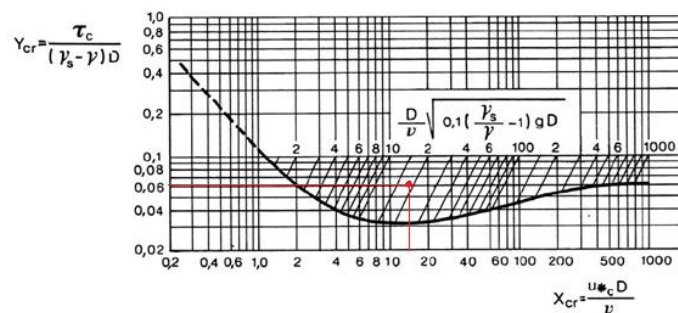


Fig. 6.66 – Posição do ponto (X,Y) em relação à curva de *Shields*

Assim, conclui-se que a tensão de arrastamento aumenta com o diâmetro, já que os gradientes de velocidade vão também aumentar. As primeiras tensões acima das críticas são registadas logo aos 2 segundos de escoamento, ilustradas na figura 6.67, na mesma zona que ocorriam para as simulações anteriores. Isto fundamenta a hipótese exposta no subcapítulo 2.1, onde foi dito que alguns autores defendem que é o vórtice em ferradura que inicia o processo erosivo.

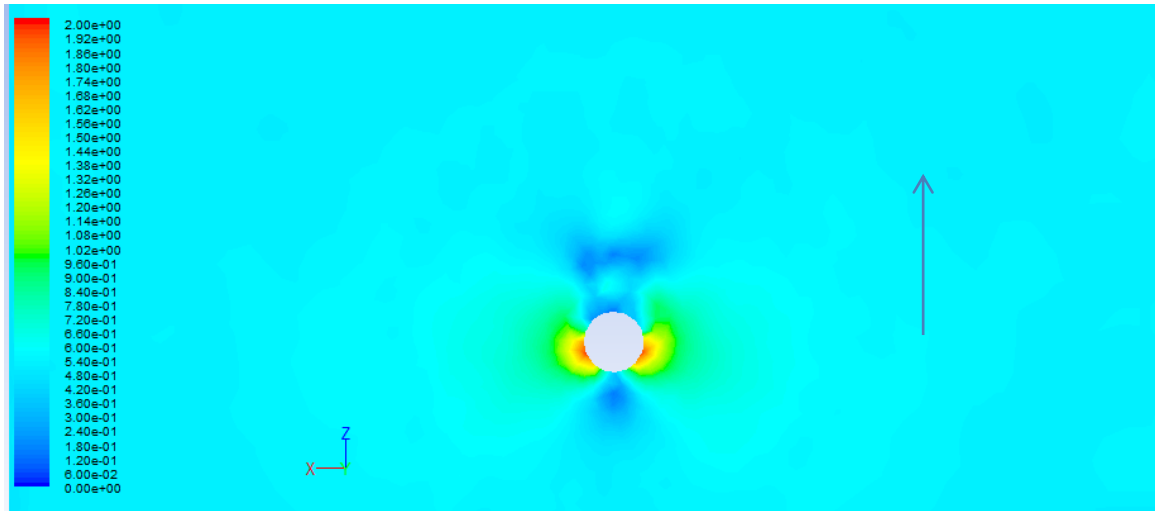


Fig. 6.67 – Tensões de arrastamento no fundo do canal, para $t=2s$

6.5.4 IMPULSÃO HIDRODINÂMICA NO PILAR

A partir da figura 3.4, sabe-se que para [14]:

$$\frac{L}{D} = \frac{0.20}{0.1} = 2 \Leftrightarrow C_D = 0.68 \quad (6.9)$$

Logo, vem:

$$0.68 = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \times 1000 \times 0.32^2 \times (0.2 \times 0.1)} \Leftrightarrow F_D = 0.70 \text{ N} \quad (6.10)$$

De acordo com o procedimento anteriormente descrito, é possível obter a força no pilar simulada pelo *Fluent* que, neste caso, é 0.59 N (figura 6.68). Portanto, o erro entre o resultado esperado e o fornecido pelo *software* é de 15.71%.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
pilar	0.5745915	0.015962645	0.5905541
Net	0.5745915	0.015962645	0.5905541

Fig. 6.68 – Force report para o pilar

6.6 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS

Na Tabela 6.1 estão sintetizados os resultados das diferentes simulações, facilitando a comparação entre os mesmos.

Tabela 6.1 – Resultados de todas as simulações realizadas

Parâmetro		Simulação nº 1	Simulação nº 2	Simulação nº 3	Simulação nº 4	Simulação nº 5
		Conf. A LES	Conf. A SST $k-\omega$	Conf. B LES	Conf. B SST $k-\omega$	Conf. Extra LES
Tempo de cálculo (h)		68	37	73	42	65
Tensão de arrastamento máxima (Pa)		1.8	2.1	0.49	0.8	0.85
Força no pilar (N)	A - Valor experimental [14]	0.348	0.38	0.253	0.253	0.7
	B - Na simulação	0.382	0.44	0.2576	0.41	0.59
	Diferença percentual entre A e B	1.72%	15.79%	1.82%	62.06%	-15.71%

Ao longo deste capítulo foram analisados os dados obtidos com as simulações computacionais, que permitem constatar que o modelo LES é superior, em termos de resultados, ao SST $k-\omega$. Naturalmente, as simulações realizadas com o último modelo referido são mais rápidas, não só devido à relação direta entre tensor das deformações e o gradiente de velocidades, mas também devido à necessidade de resolver escalas de turbulências pequenas no modelo LES. Notou-se, também, a influência da complexidade da geometria no tempo de processamento de dados e na precisão da solução, uma vez que as simulações para a configuração B demoraram mais tempo e a qualidade dos resultados não foi tão boa como aquela registada para a configuração A. Dos dois modelos testados, apenas o LES permitiu reproduzir com clareza as estruturas que se formam no escoamento, devido à perturbação induzida pelo obstáculo. Deste modo, não se aconselha o uso dos modelos a duas equações para estudar individualmente os fenómenos que se geram em torno do pilar.

Em suma, estão reunidas condições para se afirmar que as técnicas CFD fornecem valiosas informações sobre os fenómenos abordados, contudo alguns modelos numéricos carecem de alguma precisão. O avanço do *software* desta área e dos modelos de turbulência contribuirão para colmatar as lacunas referidas.

7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 ASPETOS GERAIS E CONCLUSÕES

Na dissertação apresentada foi realizada a modelação numérica em torno de um pilar isolado em duas configurações de fundo fixo, a primeira correspondendo a um fundo plano (início do processo erosivo) e a segunda correspondendo à situação de equilíbrio da cavidade de erosão junto de um pilar. Para cada configuração foram utilizados dois modelos de turbulência distintos. Assim, resultou um total de quatro simulações. Numa perspetiva de alargar este estudo, foi ainda desenvolvida uma quinta simulação do escoamento em torno de um pilar com o dobro do diâmetro inicial, em fundo plano.

A primeira simulação, com o modelo *Large Eddy Simulation*, reproduziu o escoamento sob o fundo plano com elevada fidelidade. A força de arrasto no pilar calculada diferia menos de 1.72% do valor esperado, sendo que este parâmetro é, em parte, um indicador da qualidade da simulação.

Para a mesma configuração de fundo, efetuou-se uma segunda simulação, diferindo da anterior apenas no modelo de turbulência, já que, desta vez, o modelo *SST $k-\omega$* foi o escolhido. Uma maior leveza a nível de exigência computacional foi, desde logo, evidente. A força de arrasto obtida através do cálculo numérico apresentou menor concordância com o esperado, mas ainda assim com um desvio aceitável de 15.8%.

Em ambas as simulações acima referidas, as maiores tensões tomaram lugar na zona onde se forma a cavidade de erosão. Igualmente, as primeiras tensões acima da crítica apareceram na zona do vórtice em ferradura. Assim, conclui-se que, apesar da diferença de modelos, as simulações são coerentes entre si.

Para as duas simulações seguintes (números 3 e 4), foi necessário construir um modelo geométrico que representasse a configuração do fundo, após o processo erosivo ter atingido a fase de equilíbrio. Um ensaio laboratorial foi propositadamente realizado para este fim. Reproduziu-se o escoamento anteriormente modelado, num fundo arenoso. Após conclusão do ensaio com a duração de uma semana, a cavidade de erosão atingiu o seu equilíbrio. A caracterização da sua geometria e do assoreamento que se formou mais a jusante foi um dos maiores desafios desta dissertação. O método fotográfico utilizado revelou ser de baixo custo e eficaz na caracterização da geometria de equilíbrio do fundo do canal.

A caracterização da geometria obtida no ensaio laboratorial foi transposta para um modelo geométrico tridimensional, através das linhas e pontos obtidos pelo método atrás descrito. Assim, realizaram-se mais duas simulações, análogas às anteriores, em que só mudou a configuração geométrica, novamente com os dois modelos já utilizados. Desde já, foi notória uma acrescida morosidade nos

cálculos, devido ao aumento de complexidade da geometria, comparativamente às duas primeiras simulações. Os resultados obtidos foram satisfatórios. A força de arrasto no pilar foi, mais uma vez, caracterizada com uma grande aproximação, na simulação com o modelo LES (menos de 2% de diferença ao valor esperado). Na outra simulação, com o modelo SST $k-\omega$, este valor não foi tão bem conseguido, embora outros parâmetros, como padrão de velocidades, por exemplo, sejam coerentes com os resultados obtidos a partir do modelo LES.

A simulação com o pilar de 100 mm veio possibilitar a melhor caracterização dos vórtices e o seu potencial papel no processo erosivo. Os vórtices em ferradura causam as primeiras tensões acima da crítica e os vórtices de esteira são capazes de provocar movimento nas partículas do fundo. Para além disso, foi também possível constatar que os gradientes de velocidade aumentam com o diâmetro, assim como a tensão de arrastamento.

Embora a modelação experimental continue a ser uma ferramenta valiosa e fiável no estudo da erosão localizada em pilares, a sua combinação com a modelação numérica, como foi feito nesta dissertação, apresenta vantagens muito relevantes para o desenvolvimento desta área de conhecimento.

7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Após o estudo desenvolvido e as conclusões acima apresentadas, surge evidente, para o autor deste trabalho, a necessidade de dar continuidade aos conhecimentos adquiridos e aos avanços conseguidos.

O escoamento em torno de um pilar cilíndrico isolado é um caso de estudo típico e básico nesta área. Os resultados obtidos com a presente dissertação são muito promissores, abrindo caminho para novos estudos. A modelação numérica de um escoamento em torno de pilares complexos pode ser um deles, já que é um assunto estudado no projeto de investigação em que esta dissertação se insere. Do ponto de vista técnico há, igualmente, espaço para melhorias. O processo de criação da geometria e das malhas de volumes finitos é complexo e requer tratamento minucioso, sendo que dele depende a qualidade dos resultados. É, por isso, expectável que, dentro de um prazo mais alargado que o disponível para a realização desta tese, se possa melhorar a resolução espacial das malhas utilizadas.

O *software* utilizado é uma escolha recorrente da indústria, estando consolidado e testado por milhares de profissionais. Há, no entanto, alternativas que, por manifesta limitação de tempo, não foram testadas na preparação desta dissertação.

Uma das maiores dificuldades encontradas prende-se com as elevadas exigências de cálculo computacional e, não menos importante, as de capacidade de armazenamento de dados. O recurso ao *cluster* de computação disponibilizado pelo CICA providenciaria, naturalmente, simulações numéricas mais rápidas, permitindo testar mais rapidamente as diferentes configurações a estuda.

A modelação numérica concretizada debruçou-se sobre o escoamento propriamente dito e a sua ação nas fronteiras rígidas. Num plano mais ambicioso, pode-se realizar a modelação numérica do processo erosivo em si. Em vez da simulação numérica do escoamento sob um fundo plano, seria modelado quer o escoamento, quer a alteração física do fundo, utilizando um fundo móvel (partículas individuais).

Para além das já referidas, existem mais potencialidades da aplicação da modelação numérica a esta área de estudo, que ultrapassam o âmbito desta dissertação, e que podem ser abordadas no futuro. Desta forma, sugerem-se as seguintes propostas para futuros estudos:

- Realizar simulações com geometrias intermédias, entre a fase inicial e a fase de equilíbrio;
- Testar mais modelos de turbulência;
- Efetuar uma simulação com uma malha adaptativa que siga os vórtices, ou outras zonas de interesse que se movam ao longo do escoamento;
- Adotar equipamento mais sofisticado para a caracterização da geometria no ensaio laboratorial, como medidores de varrimento laser (é uma alternativa mais segura apesar de o método de medição por fotografias ter-se revelado eficaz).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Silva, R. P. *Estudo da Erosão de Pilares de Pontes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [2] Kamil, H., Othman, K., *Simulation of flow around piers*. Journal of Hydraulic Research, Vol. 40 - no. 2, 2002
- [3] Freire, A., Ilha, A., Colaço, M. *Turbulência, Volume 5, Tomo 1*. ABCM- Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2006.
- [4] Brito, L. R. *Estudo Experimental de Erosões Localizadas Junto de Pilares Complexos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.
- [5] Pinheiro, Rui Correia. *Estudo Experimental da Erosão de Pilares de Pontes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [6] Cardoso, A.H. *Erosões localizadas junto de esporões fluviais e de encontros e pilares de pontes*. Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, texto de apoio didático, IST, Lisboa, 1998.
- [7] Fael, C. M. *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, 2007.
- [8] Breusers H. C, Raudkivi, A. J. *Scouring*. A. A. Balkema, 1991.
- [9] Couto, Lúcia Teixeira; Cardoso, António Heleno. *Erosões Localizadas junto de Encontros e Pilares de Pontes. Parte I – Caracterização da Situação de Referência*. Revista da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Volume 22, Número 1, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa, 2001.
- [10] Ferreira, P. H. *Análise experimental do Sistema “Vórtice ferradura” no Escoamento ao Redor de um Cilindro Circular*. Dissertação de Pós-Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
- [11] <http://www.onera.fr/conferences-en/3d-separation/index.php>, acedido em 10 de maio de 2012.
- [12] Perry, A. E.; Chong M. S.; Lim, T. T. *The vortex-shedding process behind two dimensional bluff bodies*. Journal of Fluid Mechanics. v. 116, 1982.
- [13] Sumer, B. M., Fredsoe, J. *Hydrodynamics around Cylindrical Structures*. World Scientific Publishing, London, 1997.
- [14] White F. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Companies; 6th edition, 2006.
- [15] Pinto, L. C. *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, 2008.

- [16] Prandtl, L.; Tietjens O. G. *Applied Hydro and Aeromechanics*. 2nd ed. New York: Dover Publications, 1957.
- [17] Pinto, L. C. *Análise por Simulação Numérica do Desprendimento de Vórtices de um Cilindro Circular em Movimento Forçado*. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 2008.
- [18] Neil, C.R. *Mean velocity criterion for scour of coarse uniform bed material*, Proceedings of the XII IAHR, Fort Collins, Colorado, 1967.
- [19] Cardoso, A. H. *Hidráulica Fluvial*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1998.
- [20] Shields. *Anwendung der Aenlichkeitsmechanik und der Turbulezforschung auf die Geschiebbewegung*. PhD thesis, Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstal fur Wasser-bau und Schiffbau, Berlim, 1936.
- [21] Quintela, A. *Hidráulica*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2000.
- [22] Melville, Bruce W., Coleman, Stephen E. *Bridge Scour*. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, 2000.
- [23] Lencastre, A. *Hidráulica Geral*, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1972.
- [24] Tennekes, H. Lumley, J. L. *A First Course in Turbulence*. MIT Press, Massachusetts, 1972.
- [25] Anderson, J. *Computacional Fluid Dynamics – The Basics with Aplications*. McGraw-Hill, Maryland, 1995.
- [26] Wendt, J. F. *Computational Fluid Dynamics*. Springer, Berlin, 2009.
- [27] Aranda, R. A. *Modelação de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas*, Tese de Mestrado Integrado, FEUP, 2010.
- [28] Ferziger, J. H.; Peric, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd Edition. Springer, Berlim, 2002.
- [29] Azevedo, A. *Estudos preliminares sobre ejeccao de vórtices em torno de um Cilindro no Regime Turbulento com Separação Laminar*. Tese de Mestrado Integrado, FEUP, 2011.
- [30] ANSYS Fluent 12.0 - *Theory Guide*, ANSYS, Inc., 2009
- [31] Silveira-Neto, A. *Simulation Numérique des Grandes Echelles d'un Ecoulement Turbulent Decollé en aval d'une Marche*, Tese de doutoramento, INPG-France, 1991.
- [32] Abrunhosa, J.D.M. *Simulação de Escoamento Turbulento Complexo com Modelagem Clássica e de Grandes Escalas*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003.
- [33] <http://www.eng.man.ac.uk/historic/reynolds/oreyna.htm>, acessado a 22 de março de 2012.
- [34] Launder, B. E. e Spalding, D. B., “The numerical computation of turbulent flows”, *Comp. Meth. Appl. Mech. Energy*, Vol. 3, pp. 269-289, 1974.
- [35] ANSYS Fluent User's Guide.
- [36] Kolmogorov, A. N., *Equations of turbulence motion of an incompressible fluid*. Akad. Nauk USSR, Ser. Phys., (transl. into English by D. B. Spalding as Imperial College, Mech. Eng. Dept. Report ON/6, 1968), Vol. 6, 1942.

- [37] Saffman, P. G., 1970, *A model for inhomogeneous turbulent flow*. Proc. R. Soc., Lond. A 317, Vol. 317, pp. 417–433.
- [38] Saffman, P. G. e Wilcox, D. C. *Turbulence-model predictions for turbulent boundary layers*. AIAA Journal, Vol. 121974.
- [39] Susin, R. M. *Análise Numérica do Escoamento em uma Sala Retangular Ventilada por um Jato Horizontal de Parede*. Dissertação de Mestrado. Universidade Católica do Panamá, 2007.
- [40] Menter, F. R., 1992, *Improved two-equation $k-\omega$ turbulence model for aerodynamic flows*, NASA TM-103975, pp.1-18
- [41] Blasek, J.; *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Elsevier, Amesterdão, 2001.
- [42] U. Piomelli. *Large-eddy and direct simulation of turbulent flows*. Lectures series on *Introduction to Turbulence Modeling*. von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2004.
- [43] Bonoa G., Lyrab P., Bonoa G. *Solução Numérica de Escoamentos Incompressíveis com Simulação de Grandes Escalas*. Mecânica Computacional Vol XXX, 1-4 Novembro 2011, Rosario, Argentina.
- [44] Martinez, D. M. V. *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. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2006.
- [45] Smagorinsky, J., *General Circulation Experiments With the Primitive Equations: I. The basic experiment*, Monthly Weather Review, 1963.
- [46] Gonçalves, N. *Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas*. Tese submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Matemática, 2007.
- [47] Bortoli, Á.L. *Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional*. Ed. Universidade/UFRGS, Porto Alegre, 2000.
- [48] <http://searchdatacenter.techtarget.com/definition/multi-core-processor>, acessado a 19 de abril de 2012.
- [49] ANSYS *Workbench User's Guide*

ANEXOS



Fig. A.1 - Fixação inferior do pilar



Fig. A.2 – Fundo arenoso

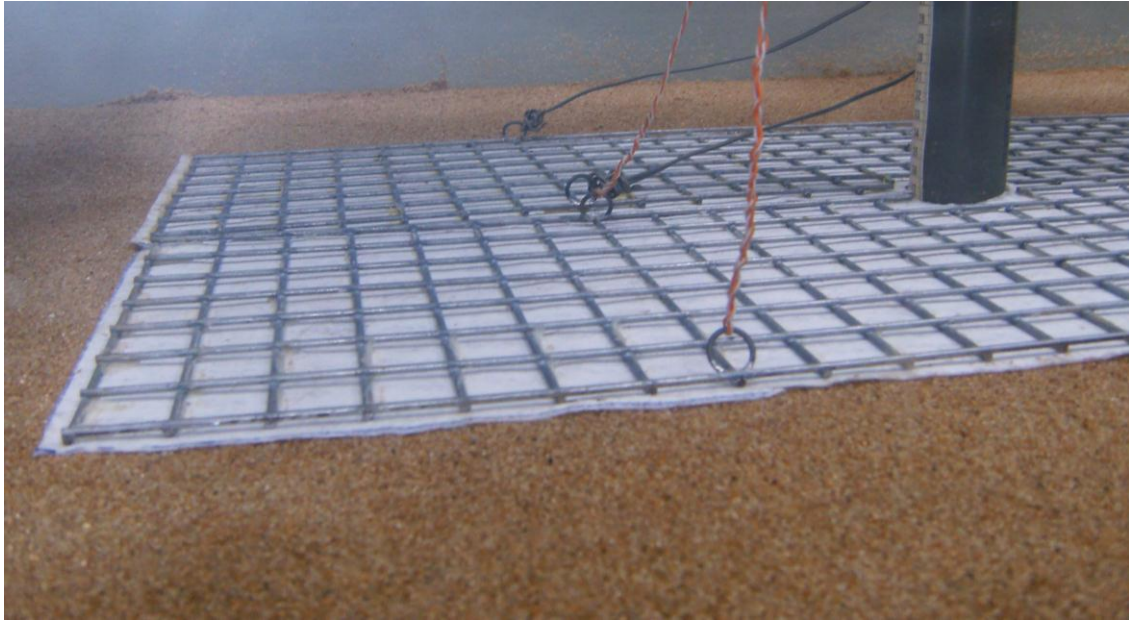


Fig. A.3 – Placas de proteção do fundo aquando da regulação do caudal



Fig. A.4 – Régua e limnómetro

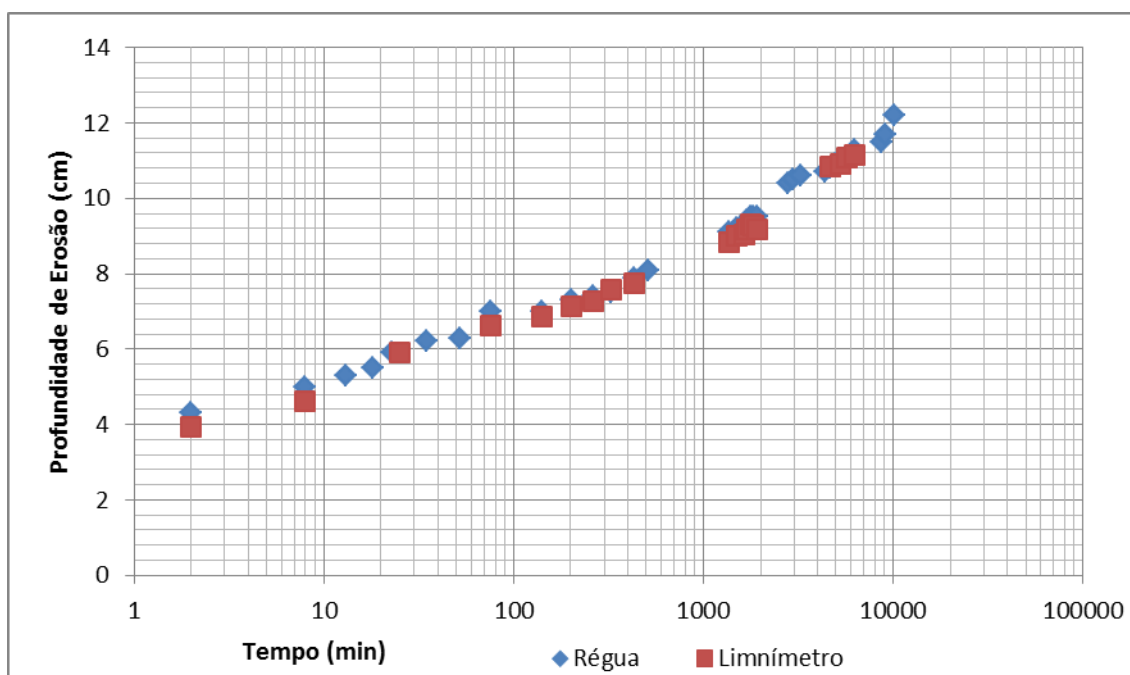


Fig. A.5 – Evolução temporal da profundidade



Fig. A.6 - Drenagem da água na cavidade de erosão ao longo do tempo

Tabela A.1 – Medições de profundidades de erosão imediatamente a montante do pilar ao longo do tempo de ensaio

Ensaio D=50mm 64 l/s h=200			Leituras (cm)		Erosões (cm)	
horas	Tempo (h)	T (min)	Régua	Limnómetro	Régua	Limnómetro
26-4-12 10:47	0:00	0	37.0	24.60	0.0	0.00
26-4-12 10:49	0:02	2	41.3	20.65	4.3	3.95
26-4-12 10:55	0:08	8	42.0	19.99	5.0	4.61
26-4-12 11:00	0:13	13	42.3		5.3	
26-4-12 11:05	0:18	18	42.5		5.5	
26-4-12 11:10	0:23	23	42.9		5.9	
26-4-12 11:12	0:25	25		18.69		5.91
26-4-12 11:22	0:35	35	43.2		6.2	
26-4-12 11:39	0:52	52	43.3		6.3	
26-4-12 12:03	1:16	76	44.0	17.96	7.0	6.64
26-4-12 13:09	2:22	142	44.0	17.75	7.0	6.85
26-4-12 14:09	3:22	202	44.3	17.48	7.3	7.12
26-4-12 15:10	4:23	263	44.4	17.33	7.4	7.27
26-4-12 16:16	5:29	329	44.5	17.02	7.5	7.58
26-4-12 18:00	7:13	433	44.9	16.85	7.9	7.75
26-4-12 19:18	8:31	511	45.1		8.1	
27-4-12 9:30	22:43	1363	46.1	15.76	9.1	8.84
27-4-12 11:42	24:55	1495	46.2	15.60	9.2	9.00
27-4-12 14:16	27:29	1649	46.3	15.55	9.3	9.05
27-4-12 15:16	28:29	1709	46.4	15.42	9.4	9.18
27-4-12 16:29	29:42	1782	46.5	15.30	9.5	9.30
27-4-12 17:15	30:28	1828	46.5	15.31	9.5	9.29
27-4-12 18:38	31:51	1911	46.5	15.43	9.5	9.17
28-4-12 9:30	46:43	2803	47.4		10.4	
28-4-12 12:00	49:13	2953	47.5		10.5	
28-4-12 17:00	54:13	3253	47.6		10.6	
29-4-12 12:00	73:13	4393	47.7		10.7	
29-4-12 17:00	78:13	4693	47.8	13.75	10.8	10.85
29-4-12 21:30	82:43	4963	47.9		10.9	
30-4-12 2:15	87:28	5248	47.9	13.68	10.9	10.92
30-4-12 9:30	94:43	5683	48.1	13.51	11.1	11.09
30-4-12 15:09	100:22	6022	48.1		11.1	
30-4-12 19:37	104:50	6290	48.3	13.45	11.3	11.15
2-5-12 11:30	144:43	8683	48.5		11.5	
2-5-12 19:00	152:13	9133	48.7		11.7	
3-5-12 11:30	168:43	10123	49.2		12.2	



Fig. A.7 – Método de medição com recurso ao limnómetro e a uma malha de pontos

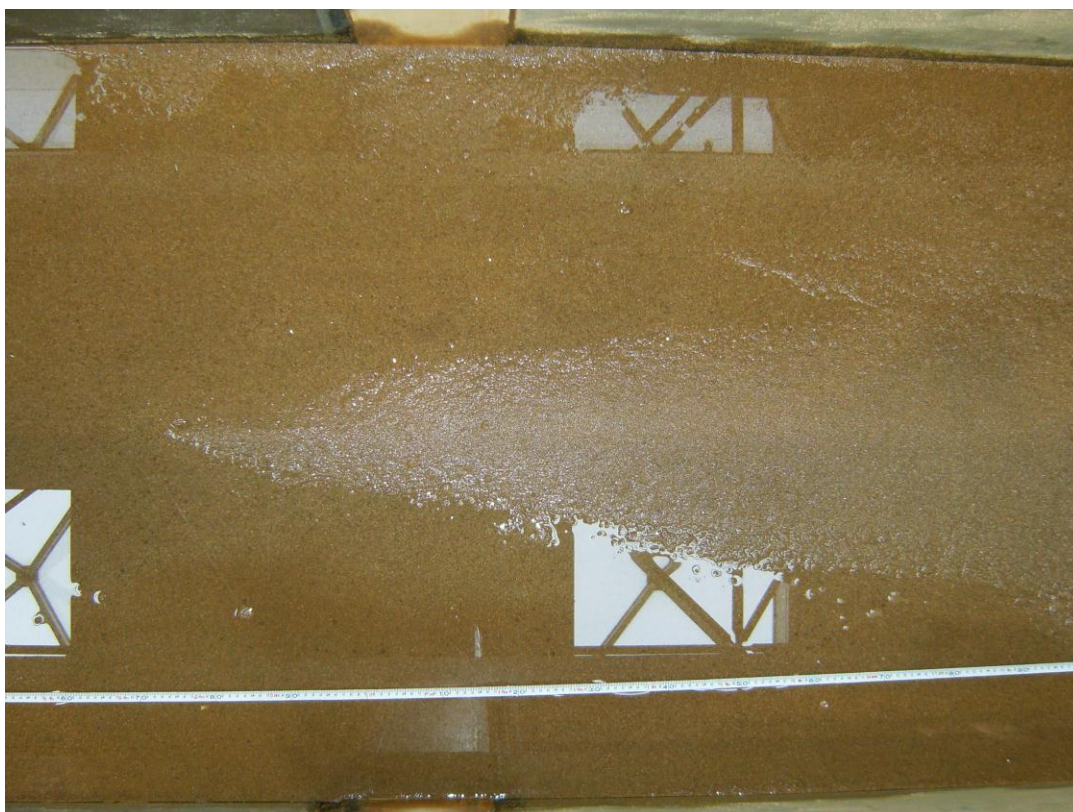


Fig. A.8 – Assoreamento a jusante do pilar

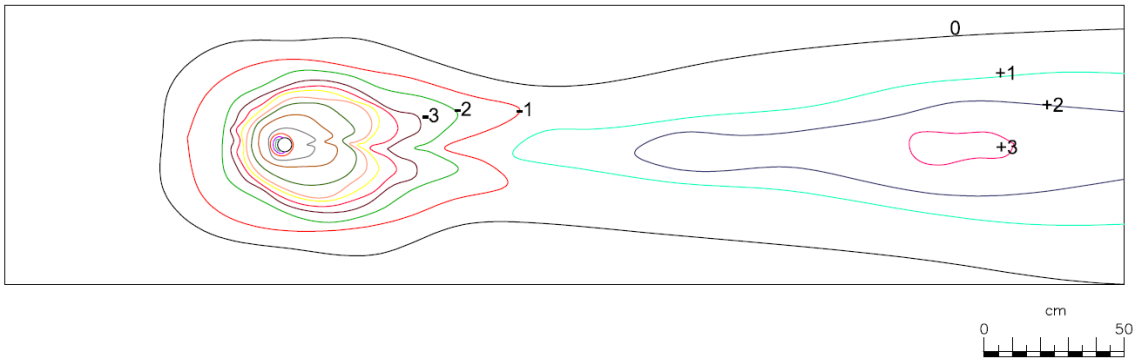


Fig. A.9 – Curvas de nível do fundo do canal após atingida a fase de equilíbrio

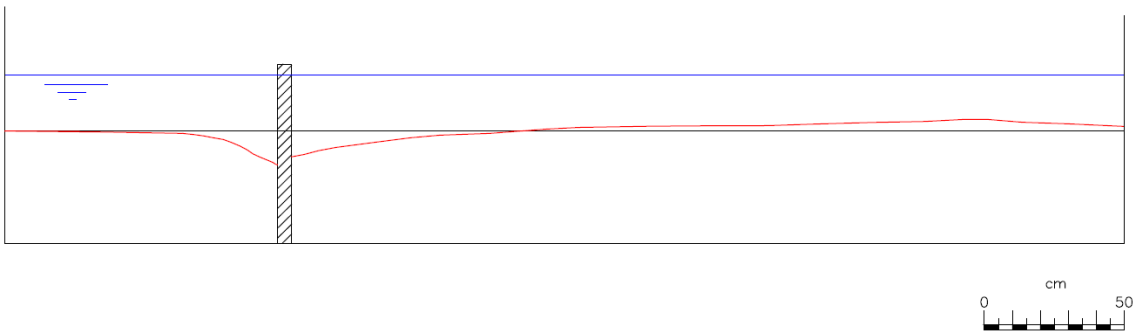


Fig. A.10 – Corte longitudinal da caixa de sedimentos após atingida a fase de equilíbrio

Tabela A.2 – Profundidades de equilíbrio da cavidade de erosão ensaio nos pontos da malha a montante do pilar

Distância longitudinal ao pilar (cm)	Pontos	8	7	6	5	4	3	2	1
-30	G	0.18						0.18	
-25	F	0.22							-1.24
-20	E	0.12	0.29	0.13	0.18	0	-0.69	-1.11	-1.21
-15	D	0.2	0.42	0.22	0.22	-1.85	-2.98	-3.57	-3.88
-10	C	0.16	0.28	-0.26	-0.29	-2.38	-3.91	-4.44	-5.63
-5	B	0.28	0.3	-0.31	-1.61	-3.14	-5.41	-8.49	-9.74
0	A	0.33	-1.2	-1.68	-2.8	-5.41	-7.48	-11.39	-12.1

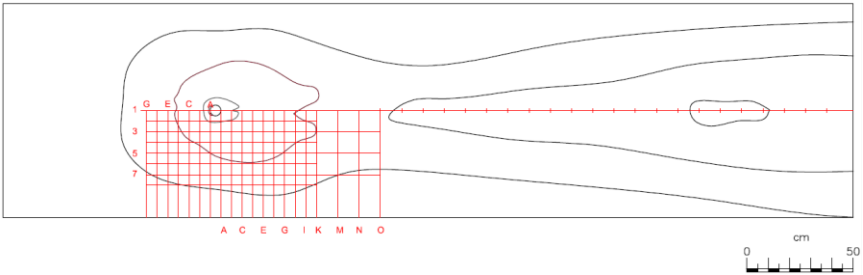


Fig. A.11 – Malha dos pontos das tabelas 3 e 4 (a interseção das linhas forma os pontos onde se mediram as profundidades)

Fig. A.12 – Profundidades de equilíbrio da cavidade de erosão nos pontos da malha a jusante do pilar

Distância ao pilar (cm)	Pontos	8	7	6	5	4	3	2	1
5	A	0.07	0.5	-0.31	-3	-5.6	-7.35	-10.18	-9.8
10	B	0	0.3	0.13	-3.89	-6.07	-7.26	-8.82	-8.95
15	C	0.13	0.25	-1.31	-3.7	-5.62	-6.78	-7.95	-6.75
20	D	0.11	-0.24	-2.3	-3.9	-4.69	-5.79	-7.05	-5.9
30	E	0.1	-0.06	-2.3	-3.42	-5.02	-5.82	-5.88	-5.14
40	F	0.19	-0.42	-1.35	-3.15	-3.97	-5.01	-5.21	-4.08
45	G	-0.06	-0.7	-1.19	-2.31	-3.42	-4.06	-4.36	-3.15
55	H		0.38		-0.31		2.29		-1.25
65	I		0.11		0.36		-1.54		-0.42
70									0.74
75	J		0.09		0.72		-0.15		0.15
80									1.18
90									1.52
100									1.85
110									2.03
120									2.3
130									2.55
140									2.52
150									2.86
160									2.98
170									2.99
180									2.98
190									3.1
200									3.34
210									3.1
220									3.1
230									3.09
240									3.01